AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO II

TOMO II

BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

PREFACIO

En este compendio se presentan avances de investigación y desarrollo tecnológico logrados en diversas áreas de la ciencia, cuyo objetivo principal es contribuir a la difusión del quehacer científico y tecnológico que se realiza en México, así como promover el trabajo interdisciplinario entre miembros de diferentes disciplinas científicas.

El presente trabajo está organizado en siete tomos los cuales corresponden a las siguientes áreas científicas: I) Biología y química, II) Biotecnología y ciencias agropecuarias, III) Ciencias sociales, IV) Físico matemáticas y ciencias de la tierra, V) Humanidades, ciencias de la conducta y divulgación científica, VI) Ingenierías, así como VII) Medicina y ciencias de la salud.

Octubre de 2025
León, Gto., México

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
Alexandra Monsetrrat García

DECLARACIÓN LEGAL

EDITORES:

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zarate
Alexandra Monsetrrat García

Avances Científicos y Tecnológicos en México II

ISBN GENERAL 978-607-8821-53-2

Fecha de otorgamiento 22/09/2025

Tomo II Biotecnología y Ciencias Agropecuarias

ISBN 978-607-8821-55-6

Fecha de otorgamiento 22/09/2025

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores.

Temacilli Editorial
Lagos de Moreno, Jalisco
http:/temacilli-editorial.com

D.R. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre
C.P. 37150 León, Guanajuato
México
Hecho en México

Avances Científicos y Tecnológicos en México II

Tomo II

Biotecnología y Ciencias Agropecuarias

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO DE CITRININA Y OCRATOXINA EN ARROZ 6

EFECTO BIOESTIMULANTE DEL SELENITO DE ZINC EN EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca Sativa*) 12

EVALUACIÓN FUNCIONAL DE LOS BIOPÉPTIDOS OBTENIDOS MEDIANTE UN PROCESO DE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA A PARTIR DE LAS PROTEÍNAS DE LA QUINOA.… 22

OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE OXIDO DE COBRE POR MÉTODO DE REDUCCIÓN QUÍMICA PARA SU USO COMO AGENTE ANTIMICROBIANO 26

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LAS ENZIMAS SECRETADAS POR *T. Versicolor* PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON BOSCALID 30

RESCATE DE PLA GRADO BIOMÉDICO EXPIRADO: IMPACTO EN LA ADHERENCIA CELULAR Y MEDIO AMBIENTE 36

ÁCIDO FOSFOROSO COMO COMO FUENTE DE FOSFITO PARA EL CONTROL DE ARVENSES EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR 42

VALORES DE REFERENCIA PARA LEUCOCITOS Y MICROHEMATOCRITO DE AMAZONA *Autumnalis Autumnalis* BAJO CUIDADO PROFESIONAL 47

INCIDENCIA DE PROTOZOARIOS PARÁSITOS GASTROINTESTINALES EN PRIMATES BAJO CUIDADO PROFESIONAL 54

UTILIZACIÓN DE HARINA DE TAPIOCA PARA LA ELABORACIÓN DE UN PAN LIBRE DE GLUTEN 64

APROVECHAMIENTO DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA EN LA PRODUCCIÓN DE VERMICOMPOSTA Y SUSTRATOS COMO ALTERNATIVA EN LA GERMINACIÓN DE *Cucumis Sativus* (PEPINO) Y *Lens Culinaris* (LENTEJA) 68

ACTIVIDAD INHIBITORIA DEL AGUARRÁS DE RESINA DE *Pinus Pseudostrobus* SOBRE 3 HONGOS FITOPATOGENOS 78

CARACTERIZACIÓN MORFOLOGICA POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE FIBRAS RESIDUALES DE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL 83

ENZIMAS EXTRACELULARES: FACTORES DE PATOGENICIDAD EN BACTERIAS HETERÓTROFAS AISLADAS DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN CUAUTEPEC (TLACUILOTEPEC, PUEBLA, MÉXICO) 89

CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES TOTALES Y GRADOS BRIX EN *Agave Cupreata* PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL EN GUERRERO 99

EXTRACCIÓN, BIOACCESIBILIDAD Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE HONGO AZUL (*Lactarius Indigo*) DURANTE LA DIGESTIÓN IN VITRO 105

EVALUACIÓN DE DIFERENTES SUSTRATOS AGROINDUSTRIALES EN EL CULTIVO DEL HONGO (*Pleurotus Spp*) EN EL ESTADO DE DURANGO 116

FORMULACIÓN DE UN DULCE TÍPICO A BASE DE GARBANZO Y LENTEJA COMO ALIMENTO FUNCIONAL 121

DEL ALTAR AL PALADAR ¡POVECHO! 125

IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN EL SIMBIOSISTEMA *Azolla-Anabaena Azollae* Y MECANISMOS DE TOLERANCIA 131

CARACTERIZACIÓN DE VINAZA DE AGAVE Y SELECCIÓN DE MICROORGANISMOS CON POTENCIAL BIODEGRADADOR PARA SU TRATAMIENTO BIOLÓGICO 138

USO DE MATERIALES SUSTENTABLES Y DE BAJO COSTO PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA 152

CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE CHILE (*Capsicum Annuum* L.) 158

CIENCIA Y TRADICIÓN: APERTURA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGAVES NATIVOS Y SUS DESTILADOS DE LA UANL 162

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE FERTILIZANTES SOSTENIBLES A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES 169

PASTA DE SOYA COMO FUENTE PROTEÍNICA PARA EL ENRIQUECIMIENTO DEL ENSILADO DE AGAVE 178

USO DE HERRAMIENTAS DE IA PARA OPTIMIZAR EL EXTRACTO DE SEMILLA DE ACEITE DE *Moringa Oleifera*: ELECTROCOAGULACIÓN MEJORADA PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS DEL AGUA 186

FOTOCATÁLISIS CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2) COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE VINAZAS TEQUILERAS: EVALUACIÓN DE SU VIABILIDAD Y EFICIENCIA..... 198

Bacillus Subtillis EN LA GERMINACIÓN DEL CHILE YAHUALICA (*Capsicum Annuum L.*) 205

IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS PARA LA DEGRADACIÓN DE PLÁSTICOS..... 211

PERCEPCIÓN DE LOS PRODUCTORES SOBRE EL MANEJO DE LOS HERBICIDAS EN EL CULTIVO DE PIÑA 219

USO DEL MÉTODO DE ASCENSO MÁS PRONUNCIADO PARA LA SELECCIÓN DE CONDICIONES DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNA DEL SUBPRODUCTO DE TOMATE 225

DESARROLLO DE APÓSITOS BIOCOMPATIBLES A BASE DE CELULOSA BACTERIANA PARA APLICACIONES TERAPÉUTICAS 231

QUITOSANO FOLIAR MEJORA LA ABSORCIÓN DE Mn, Zn Y B EN VÁSTAGO DE LISIANTHUS..... 239

EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD AGUDA DE ÓXIDO DE ALUMINIO Y ZINC EN Artemia Salina..... 244

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE HARINA DE GUAYABA, OBTENIDA A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA 251

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y POTENCIAL ALIMENTARIO DE BUGAMBILIA FUCSIA (*Bougainvillea Glabra*) 259

EFECTOS DEL PRASEODIMIO EN LA ALTURA DE PLANTA Y NÚMERO DE FLORES DE PENSAMIENTO MINI (*Viola Cornuta*) 266

EFECTO DEL SECADO DE CAFÉ CEREZA BAJO CONDICIONES CONTROLADAS 271

EFECTO DE LA LUZ LED (AZUL, ROJA Y AZUL + ROJA) EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO INICIAL DE *Moringa Oleifera Lam* 275

FASES DE SELECCIÓN Y RENDIMIENTO EN CAMPO DE NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum Spp*) 280

IMPACTO DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN DE LA LENTEJA VERDE (*Lens Culinaris M.*) SOBRE COMPUESTOS ANTINUTRICIONALES 285

CLONACIÓN DE LOS GENES HEWC-1 Y HEWC-2 DEL FOTORRECEPTOR DE LUZ AZUL Y SU EFECTO EN LA PRODUCCIÓN DE METABOLITOS SECUNDARIOS INHIBIDORES DE A-GLUCOSIDASA DE *Hericium Erinaceus* 291

CONSULTA SOBRE EL CONSUMO DE CARNE DE CONEJO EN LA POBLACIÓN DE SALVATIERRA 298

ELICITACIÓN QUÍMICA DE FRIJOL COMÚN (*Phaseolus Vulgaris* L.) VAR. PINTO SALTILLO) PARA LA INDUCCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DURANTE LA FORMACIÓN Y LLENADO DE VAINAS 310

USO DE BIOFERTILIZANTES EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA (*Lactuca Sativa*): ESTUDIO COMPARATIVO…. 322

ANÁLISIS TOXICOLÓGICO DE TINTES DE CABELLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL 335

ESTABLECIMIENTO DE UN REPOSITORIO *IN VIVO* PARA TIZÓN DE LA HOJA, MANCHA FOLIAR Y ROYA DEL MAÍZ, PROVENIENTES DE ZONAS MAICERAS ALTAMENTE PRODUCTIVAS DE SINALOA 341

EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA DEL 2,4-DINITROFENOL EN *Microcystis Aeruginosa* 349

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE NEJAYOTE EMPLEANDO UN REACTOR UASB 356

ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA (AgNP´S) A PARTIR DE ROMERO PARA SU APLICACIÓN EN CULTIVOS IMPREGNADOS CON *Xanthomonas Arboricola Pruni* 368

EFECTO DEL RESVERATROL SOBRE LOS FIBROBLASTOS DE PIEL DE HÁMSTER SIRIO DORADO NEONATO Y ADULTO 378

ANÁLISIS DE PESTICIDAS EN POLEN DE TRES MUNICIPIOS DE GUANAJUATO 384

AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE BACTERIAS PROMOTORAS DECRECIMIENTO VEGETAL EN CULTIVOS AGRICOLAS 392

USO DE RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES PARA MINIMIZAR LA DEGRADACIÓN DE CLOROFILA EN CHILES ASADOS 402

ELABORACIÓN DE UN SUPLEMENTO ALIMENTICIO A BASE DE HONGO (*Pleurotus Ostreatus)* CON ADICIÓN DE C4H2FeO4 (FUMARATO FERROSO) 408

EFECTO DEL PROCESADO POR ULTRASONIDO PARA PRESERVAR COMPUESTOS BIOACTIVOS DURANTE EL ALMACENAMIENTO ACELERADO DEL ACEITE DE *Persea Americana Var. Hass* 414

OBTENCIÓN DE SIDERÓFOROS DE LOS AISLADOS DE *Azotobacter Sp*. EN DIFERENTES CONCENTRACIONES DE HIERRO 423

EFECTO DEL USO DE DESINFECTANTES EN GRANOS DE CAFÉ EN BABA 430

ESTIMULACIÓN DE SEMILLAS DE JITOMATE SALADET MEDIANTE IRRADIACIÓN MAGNÉTICA PARA MEJORAR SU GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO 437

INFLUENCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE SEMILLAS DE *Echinocactus Grusonii* Y *Lens Culinaris* 444

EFECTO DE LA DIGESTIÓN *IN VITRO* EN LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE BEBIDAS A BASE DE JUGO DE GRANADA, PROTEÍNAS DE SUERO DE LECHE Y AMARANTO 451

ESTABILIDAD DEL COLOR DE UNA FIBRA NATURAL TEÑIDA CON CÁSCARA DE CACAO CONTRA EL COLORANTE SINTÉTICO 461

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADO SOBRE LAS PROTEÍNAS DEL GRANO DE AMARANTO 466

BIOENSAYO DE TOXICIDAD AGUDA EN CUATRO BIOMODELOS UTILIZANDO LIMPIADOR MULTIUSOS 470

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO CON PECES PLATI (*Xiphophorus Maculatus*) Y ENERGÍA SOLAR 475

EFECTO DEL RESVERATROL SOBRE EL BALANCE REDOX EN EMBRIONES PARTENOGENÉTICOS DE OVINO 487

USO DE BIODIGESTORES EN CENTROS EDUCATIVOS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS COMO MÉTODO DE CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SISTEMA RECOLECTOR DE BASURA..... 496

LANTANO EN EL CRECIMIENTO DE LISIANTHUS VARIEDAD ECHO LAVANDA 500

EVALUACIÓN IN VITRO DE ACTIVIDAD ANTAGÓNICA BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO DE PLANTAS Y HONGOS FITOPATÓGENOS 505

recolección Y Reproducción Del Hongo Pedo De Lobo *(Lycoperdon Perlatum)* A TRAVÉS DE MEDIOS DE CULTIVOS ESPECÍFICOS 512

ALTURA, DIÁMETRO DE TALLO Y GRADOS BRIX EN NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum Spp.*) PARA EL CAMPO CAÑERO MEXICANO 517

CARACTERIZACION MOLECULAR Y MICELIAL DE UNA CEPA AMARILLA DEL GÉNERO *PLEUROTUS*..... 522

LANTANO EN EL NÚMERO DE HOJAS Y EL ÁREA FOLIAR DE TRES VARIEDADES DE ALCATRAZ..... 531

SOLUBILIDAD DE BIOPLÁSTICOS REFORZADOS CON HOJA DE YUCA (PALMA DEL SEMIDESIERTO) 536

EVALUACIÓN DE LA BIOSORCIÓN DE FLUORURO DE SODIO Y NITRATO DE PLATA EN CEPAS BACTERIANAS MEDIANTE ABSORCIÓN ATÓMICA 543

¿CALENTAMIENTO GLOBAL, SEQUÍA?: NOPALES CADA DÍA 547

SITUACION ACTUAL DE LOS ENVASES GENERADORES DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN EL CULTIVO DE PIÑA (*Ananas Comosus* L) 552

EFECTO DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE FLORES DE FRIJOL AYOCOTE SILVESTRE… 561

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ANOMALÍAS “EL NIÑO”, “LA NIÑA” Y “AÑOS NORMALES” EN LA PRODUCCIÓN DE MIEL EN LA ZONA ORIENTE DEL ESTADO DE TLAXCALA..... 573

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE SEMILLA DEL ZAPOTE NEGRO (*Diospyros Nigra*) 584

FABRICACIÓN DE TEJAS BIODEGRADABLES A BASE DE FIBRA DE COCO, COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN LA SUSTITUCIÓN DE TEJAS DE ORIGEN PLÁSTICO..... 595

CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA Y FUNCIONAL DE LOS PÉPTIDOS OBTENIDOS MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA SOBRE LAS PROTEÍNAS DEL GRANO DE AMARANTO..... 608

BIOABSORBENTES NO CONVENCIONALES EMPLEADOS EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS Y COLOR EN DIFERENTES TIPOS DE AGUA..... 613

EVALUACIÓN DE LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO INICIAL DE COL (*Brassica Oleracea Var. Capitata L.)* EN CONDICIONES DE AGRICULTURA DE AGUA FRÍA (COLDAG) Y AGRICULTURA CONVENCIONAL (CONVAG)..... 620

ANALIZAR MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS EL CRECIMIENTO DE PLANTAS UTILIZANDO UN FERTILIZANTE A BASE DE RESIDUOS DE CAFÉ, CASCARAS DE HUEVO Y PLÁTANO . 627

INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OG Y OG-N EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLA FORESTAL..... 637

LA BIOESTIMULACIÓN CON TITANIO AFECTA LAS CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIMENTOS EN CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* Spp.)..... 646

OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE BAGAZO DE AGAVE MEZCALERO 651

GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE JITOMATE (*Solanum Lycopersicum L.*) BAJO LUZ FLUORESCENTE 657

EVALUACIÓN DE *Clavispora Lusitanea* Y35 EN LAS LINEAS PARENTALES DE MAÍZ B41 Y B51…… 666

ELABORACIÓN DE MICOCOSMETICOS CON HONGOS SILVESTRES, COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA PARA MUJERES EN EL MEDIO RURAL..... 672

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN INVERNADERO EN LA PRODUCCIÓN DE HONGOS 677

EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO ÁCIDO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE APIO 691

PRODUCCIÓN DE EMBRIONES DE OVINO POR FIV EN MEDIO SECUENCIAL SIMPLE..... 700

BIODIVERSIDAD MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA: EXPLORANDO EL POTENCIAL DE LA PRESA DE LA PURISIMA 707

EVALUACIÓN DE LA MICROBIOTA DURANTE EL PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ 712

CLORURO DE LITIO AFECTA LA TASA DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE MAÍZ (Zea Mays L.) 720

CONTENIDO DE CITRININA Y OCRATOXINA EN ARROZ

José Ángel Rocha Granados[1], Virginia Angélica Robinson Fuentes [2]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología, [2] Facultad de Ciencias Médicas y Biológicas "Dr. Ignacio Chávez", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
[1] 2028638ª@umich.mx, [2] virginia.robinson@umich.mx

RESUMEN

Las micotoxinas son metabolitos secundarios producidos por hongos que crecen en diversos alimentos y poseen efectos tóxicos sobre diversos órganos. En este estudio, se tiene especial interés en el riñón. La ocratoxina A (OTA) es una micotoxina presente en alimentos como los cereales, frijoles, frutos secos, vino, café y té, entre otros. Esta toxina se produce por especies de *Penicillium* y *Aspergillus*. Por su parte, la citrinina (CIT) se encuentra en alimentos como arroz, avena, centeno, cebada, maíz y trigo, así como en productos cárnicos fermentados y piensos. Es producida por hongos de los géneros *Penicillium, Aspergillus* y *Monascus*. Ambas micotoxinas son nefrotóxicas y actúan de manera sinérgica. Es crucial garantizar que los alimentos consumidos sean seguros, especialmente aquellos que se consumen en las casas de estudiantes de la UMSNH de Morelia, Michoacán. Por esta razón, se realizó un análisis para detectar la presencia de OTA y citrinina en muestras de arroz disponible en las casas de estudiantes citadas. Se obtuvieron ocho muestras de arroz de casas de estudiantes. Cada muestra de 100 g fue triturada con un molino eléctrico y luego pasada por un tamiz de malla N°20. Posteriormente, se mezclaron 20 g de la muestra con el solvente de extracción (acetonitrilo al 80% en agua destilada) y se agitaron a 400 rpm durante 5 minutos con una barra magnética. La mezcla fue centrifugada a 1970 G durante 5 minutos, y el sobrenadante se concentró en un rotavapor hasta obtener un volumen final de entre 3.5 y 4.5 mL. Se aplicaron 10 µL de los extractos sobre placas de TLC de sílica gel (20 x 10 cm, Sigma Aldrich), junto con estándares de ocratoxina A y citrinina (16 ug/uL), utilizando como fase móvil una mezcla de benceno, metanol y ácido acético (24:2:1). La presencia de Ocratoxina A y Citrinina se reveló mediante lámpara de luz UV a 254 nm. Además, se realizó la determinación de Ocratoxina A en los extractos obtenidos de arroz por ELISA, siguiendo las instrucciones del fabricante (Ridascreen Fast Ocratoxina A). Utilizando cromatografía en capa fina, no se observó ninguna banda que revelara la presencia de alguna de las dos micotoxinas ensayadas. Mientras que, por ELISA, se encontró que tres muestras presentan concentraciones de ocratoxina A cercanas al límite de detección. Sólo una muestra presentó una concentración de 1.567 µg de OTA/Kg de arroz; sin embargo, este valor está dentro del límite permitido por la Unión Europea. Entonces, el arroz que consumen los habitantes de las casas de estudiante de la UMSNH puede considerarse seguro. En este trabajo se destaca la importancia de utilizar dos técnicas analíticas diferentes, para asegurar la inocuidad de los alimentos.

Palabras clave: Micotoxinas, Nefrotóxicas, Contaminación en granos de arroz, Casas de Estudiantes y TLC

INTRODUCCIÓN

Las micotoxinas son metabolitos secundarios con diferentes propiedades químicas, biológicas y toxicológicas, producidas por hongos que se desarrollan en productos vegetales (Cabañes et al., 2002). Hoy en día se han identificado más de 500 micotoxinas, aunque principalmente seis (aflatoxinas, tricotecenos, zearalenona, fumonisinas, ocratoxinas y patulina) son reguladas y estudiadas en los alimentos, lo que plantea problemas de seguridad alimentaria impredecibles y continuos en todo el mundo.

La ocratoxina A (OTA) (Figura 1) es una micotoxina abundante en los alimentos ya que está presente en granos de cereales, frijoles, frutos secos, vino, café y té, entre otros alimentos. Además de ser la más peligrosa de las ocratoxinas. Esta toxina es comúnmente producida por varias especies de *Pennicillum y Aspergillus*. Específicamente, una preocupación importante es la nefrotoxicidad

severa, que se caracteriza por la degeneración de las células epiteliales de los túbulos proximales y los intersticiales (Imaoka et al., 2020). Además, posee propiedades carcinógenas, nefrotóxicas, teratogénicas e inmunotóxicas.

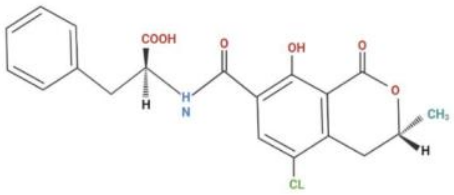


Figura 1. Estructura química de la ocratoxina A.

La Citrinina (CIT) (Figura 2) se ha encontrado principalmente en productos alimenticios o de origen vegetal. Además, su presencia es detectada en varios cereales (avena, centeno, cebada, maíz, trigo y arroz) (Arroyo, 2013; Becerra E., 2013), en jugos de frutas y nueces tostadas (almendras. avellanas, pistaches y cacahuates) y especias (cilantro, hinojo, pimienta negra, cardamomo y comino) (Kamle et al., 2022).

También ha sido encontrada en productos cárnicos fermentados y piensos, entre otros (Jiménez-Colmenero et al., 2001). Es una micotoxina producida por especies de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Monascus*. Tiene efectos nefrotóxicos en humanos afectando la cadena respiratoria mitocondrial, el hígado, médula ósea y riñón, siendo el riñón su órgano objetivo principal. Un estudio cinético tóxico de CIT en humanos reveló que la CIT es rápidamente absorbida y transportada a los riñones e hígado (Vidal et al., 2018) donde el 40% es eliminada en la orina, lo que implica que el ≥ 40% de CIT fue absorbido (Degen et al., 2018). La CIT produce necrosis del epitelio del túbulo distal en los riñones, alterando la función y degenerado los procesos de los tubos renales.

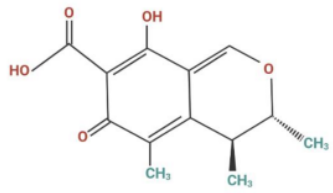


Figura 2. Estructura química de la citrinina.

La citrinina puede producirse durante el secado o el almacenamiento de cultivos cereales y otros productos alimenticios. En la tabla 1 se muestra una visión resumida de la presencia de CIT en algunos productos alimenticios (Kamle et al., 2022).

Tabla 1. Aparición de citrinina en alimentos y suplementos alrededor del mundo.

Alimento/Suplemento	País	Intervalo (µg/kg)
Arroz	Canadá	700-1130
Arroz rojo fermentado (RFR)	China	140–44,240
	Croacia	95–98
Cereales	Alemania	61.1
	Nigeria	88.5

Maíz	Mozambique	531–5074
	Serbia	7–10058
Trigo	Canadá	175.2

Para la determinación de micotoxinas en diferentes muestras se tienen varias técnicas analíticas disponibles como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS), la LC acoplada a un detector de fluorescencia (Meulenberg, 2012). Ambas técnicas son muy sensibles y específicas; sin embargo, requieren de equipo costoso, así como de personal altamente capacitado para su manejo, lo cual no es accesible para todos los laboratorios. Dentro de las técnica cromatográficas, se tiene a la Cromatografía en Capa Fina (CCF o TLC, por sus siglas en inglés) que antes era la técnica aprobada por la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (AOAC, por sus siglas en inglés) pero se descartó por ser una técnica semicuantitativa. Sin embargo, con el equipo adecuado puede ser una técnica cuantitativa que puede ser implementada en laboratorios con diferentes recursos. Otra técnica muy usada tanto cuantitativa como cualitativamente en el ensayo por inmunoadsorción ligado a enzimas (ELISA). Esta última técnica es relativamente económica y actualmente existen equipos que se pueden llevar a campo con fines de control de calidad, en situaciones en las que hay que tomar decisiones rápidas. En este método se utiliza un antígeno inmovilizado que se detecta por un anticuerpo unido a una enzima que es capaz de generar un producto colorido. La intensidad del color permite la medición indirecta del antígeno (en este caso, micotoxina) por espectrofotometría (Meulenberg, 2012). ELISA es una técnica muy rápida, muy sensible y se pueden determinar una gran cantidad de micotoxinas. Desafortunadamente, esta técnica sólo permite la determinación de una sola micotoxina a la vez. El uso de dos técnicas analíticas con principios diferentes permite una determinación certera del contenido de tóxicos ambientales y se puede tener seguridad de la inocuidad de los alimentos.

Los cereales son de los alimentos más consumidos en todos los países. En México, el arroz se consume casi a diario, aunque no en las proporciones que se consumen en Asia, por ejemplo. Es por eso que es de suma importancia establecer si los alimentos, tales como arroz consumido en las casas de estudiantes en la Ciudad de Morelia, Michoacán contienen presencia de OTA y de CIT.

OBJETIVO

Evaluar la contaminación por ocratoxina A y de citrinina en arroz disponible en diferentes casas de estudiantes en la ciudad de morelia, Michoacán.

PARTE EXPERIMENTAL

Reactivos y estándares

Estándar de OTA ≥98% grado HPLC (Sigma-Aldrich) y un estándar de Citrinina ≥98% grado HPLC (Sigma-Aldrich). Solventes y reactivos para la fase móvil de TLC (grado ACS, J.T. Baker): tolueno, acetato de etilo, ácido fórmico, benceno, metanol y ácido acético. Solventes de extracción (J.T. Baker): acetonitrilo grado HPLC y agua bidestilada.

Obtención de las muestras

Las muestras de arroz fueron proporcionadas por habitantes de las siguientes casas de estudiantes: Lucio Cabañas Barrientos, Nicolaíta, José Isaac Arriaga, Ernesto Che. Guevara, Rosa Luxemburgo, Josefa Ortiz de Dominguez y dos muestras de arroz comercial proveniente de la India (Royal y Keye).

Extracción de OTA y citrinina en diferentes muestras de arroz

Se pesaron 100 g década una de las 8 muestras de arroz, se trituran con molino eléctrico, se pasan por tamiz del N°20. Se mezclan 20 g con 50 mL de solvente de extracción (acetonitrilo al 80% en agua destilada) y se llevan a agitación con barra magnética a 400 rpm por 5 min. Posteriormente, la

muestra se centrifugó a 1970 G por 5 minutos y el sobrenadante se concentró en rotavapor hasta obtener un volumen de entre 3.5-4.5 mL. Los extractos se mantuvieron en refrigeración hasta su uso.

Determinación de OTA y CIT por Cromatografía en Capa fina.
10 µL de los extractos se aplicaron en placas de TLC sílica gel de 20cm x10cm junto con estándares de ocratoxina A y citrinina (16 µg/ µL) usando como fase móvil benceno/metanol/ácido acético (24:2:1). La fase móvil se dejó correr hasta el 90% de la altura de la placa. La presencia de OTA y CIT se determinó con lámpara de luz UV a 254 nm.

Determinación de OTA por ELISA.
Se utilizó el Kit RIDASCREEN®FAST Ochratoxin A. Inmunoensayo enzimático competitivo para el análisis cuantitativo de ocratoxina A en granos y piensos, 48 pocillos. Las concentraciones de OTA en µg/kg se obtuvieron mediante una curva de calibración. El kit contiene estándares de 1, 3, 10, 30, 100 µg/L de OTA.

RESULTADOS

Selección fase móvil para TLC

La Figura 3 muestra a los estándares de OTA y CIT usando como fase móvil XXXXX. Se observa que las concentraciones de citrinina son muy elevadas por lo que se buscó una mejor fase móvil con el que se pudiera

A) B)

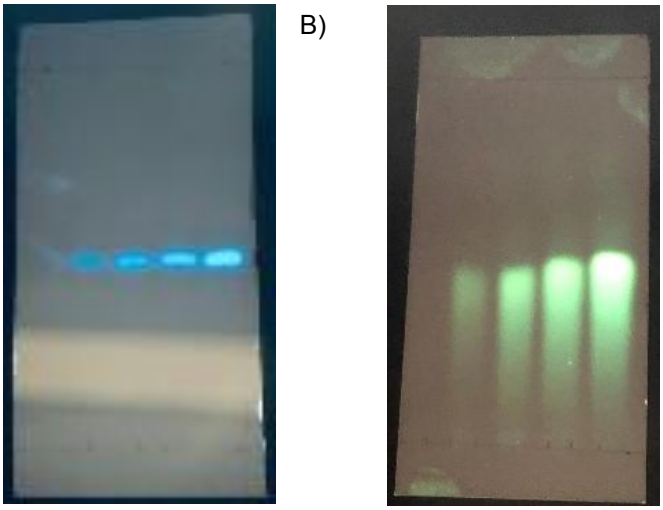


Figura 3. Estándares de OTA (A) y CIT (B) en placas de TLC usando como fase móvil la mezcla de tolueno/acetato de etilo/ácido fórmico (6:3:1) : Concentraciones: 2, 6, 10, 15 y 20 µg/ µl. Las concentraciones aumentan de izquierda a derecha.

En la Figura 4, se observan los corrimientos observados para los estándares de OTA y CIT con tres fases móviles diferentes. Las fases móviles de Tolueno/acetato de etilo/ácido fórmico (6:3:1) y Tolueno/acetato de etilo/ácido fórmico (7:3:1) muestran un corrimiento adecuado de las dos micotoxinas; sin embargo, la citrinina no logra tener un corrimiento adecuado. La mezcla de benceno/metanol/ácido acético (24:2:1) muestra que se define mejor la banda de la citrinina y la de ocratoxina A es un poco más definida. Por lo tanto, se elige esta fase móvil (benceno/metanol/ácido acético, 24:2:1) para las determinaciones posteriores.

Se colocaron en la misma placa tres estándares de concentraciones diferentes de OTA y CIT junto con 4 extractos de las muestras de arroz en cada placa. La Figura 5 muestra las placas que contienen las bandas obtenidas después de los corrimientos. No se alcanzan a apreciar bandas

correspondientes a los extractos de arroz cuando las placas fueron observadas bajo luz UV a 254 nm en cámara especial. Por lo que se podría considerar que las muestras están libres de las micotoxinas ensayadas o que se encuentran en una concentración tan pequeña que no se alcanzan a apreciar. Cabe señalar que la apreciación es visual, por que está sujeta a error humano.

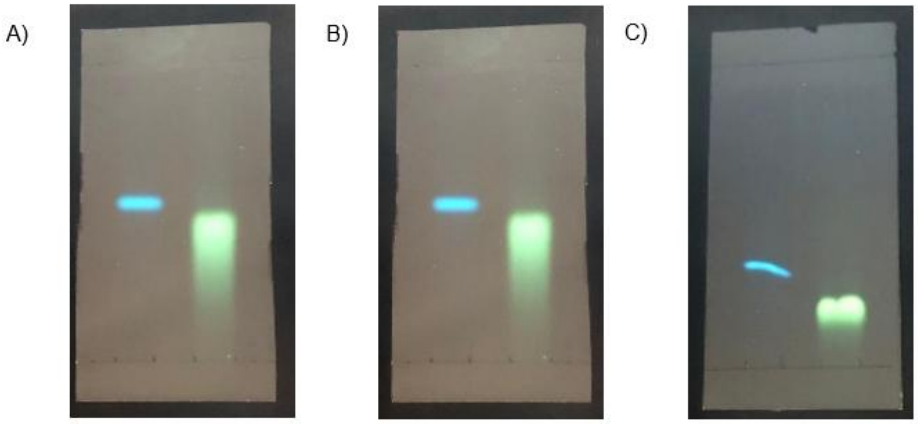


Figura 4. Estándares de OTA y CIT en placas de CCF. Utilizando 3 tipos diferentes de fase móvil: A. Tolueno/acetato de etilo/ácido fórmico (6:3:1); B. Tolueno/acetato de etilo/ácido fórmico en una proporción (7:3:1) y C. Benceno/metanol/ácido acético (24:2:1).

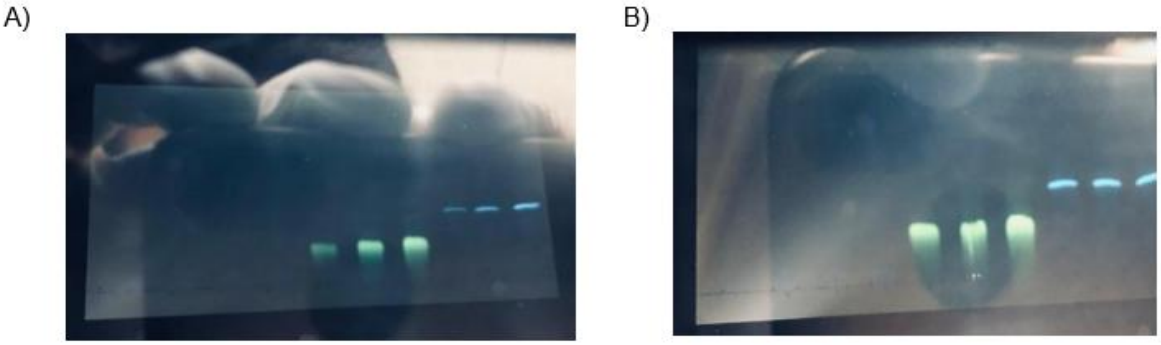


Figura 5. Muestras analizadas en placa de 20 x 10 cm. A) los primeros cuatros carriles corresponde a las muestras provenientes de las casas de estudiantes; Lucio Cabañas Barrientos, Nicolaíta, José Isaac Arriaga y Ernesto Che Guevara, los siguientes tres carriles correspondieron a estándares de CIT y los últimos tres carriles a estándares de OTA B) los primeros cuatros carriles corresponde a las muestras provenientes de las casas de estudiantes; Rosa Luxemburgo, las dos muestras comerciales y Josefa Ortiz de Domínguez; los siguientes tres carriles correspondieron a estándares de CIT y los últimos tres carriles a estándares de OTA.

Finalmente, se realizó la determinación de OTA por la técnica de ELISA. Para esto se usaron los extractos de arroz mencionados al principio y mismos que fueron usados para la determinación de las micotoxinas por CCF. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos por esta técnica. Se observa que, de las 8 muestras ensayadas, 5 tuvieron concentraciones por debajo del límite de detección. De las otras tres muestras se tiene que sólo una tuvo una concentración medible que fue de 1.567 μg/Kg de producto; esta concentración se encuentra dentro del límite máximo permitido de 3 μg/Kg que establece el Reglamento de la Unión Europea n.º 1881/2006 para cereales procesados como el arroz (Banahena et al, 2024). Sólo la Unión Europea cuenta con límites máximos de OTA para varios tipos de alimentos y sus derivados.

Tabla 2. Concentraciones de OTA encontradas en las muestras de arroz por ELISA

Procedencia	C (μg/Kg)
Casa Lucio Cabañas	n.d.
Casa Nicolaita	n.d.
Casa José Isaac An.drriaga	n.d.
Casa Ernesto Che Guevara	n.d
Casa Josefa Ortíz	n.d
Muestra comercial Keye	+
Muestra Comercial Royal	1.567
Casa Rosa Luxemburgo	+

CONCLUSIONES

La ventaja de usar dos técnicas para la determinación de contaminantes tóxicos radica en que se conoce mejor la posible presencia de tales sustancias en los alimentos. Con Cromatografía en Capa Fina no se detectó alguna de las micotoxinas mientras que usando ELISA fue posible determinar la presencia de OTA aunque en cantidades que no pueden ser cuantificadas. Con la combinación de estos resultados, sabemos que las muestras de arroz analizadas son seguras para su consumo por los estudiantes que residen en las casas de estudiante señaladas. Desafortunadamente, no fue posible detector la presencia de CIT, ya que ambas micotoxinas tienen un efecto sinérgico.
Ambas técnicas tienen sensibilidades diferentes, son de fácil uso, por lo que se recomienda su combinación para laboratorios que no cuentan con instrumentos analíticos sofisticados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Banahene JCK, Ofosu IW, Odal BT, Lutterodt HE, Agyemang PA, Ellis WO (2024). Ochratoxin A in food commodities: A review of occurrence, toxicity, and management strategies. *Heliyon*, 10 (20), e39313, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39313
2. Cabañes, F. J., Accensi, F., Bragulat, M. R., Abarca, M. L., Castellá, G., Minguez, S., & Pons, A. (2002). What is the source of ochratoxin A in wine? *International Journal Of Food Microbiology*, *79*(3), 213-215. https://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00087-9.
3. Degen, G. H., Ali, N., & Gundert-Remy, U. (2018). Preliminary data on citrinin kinetics in humans and their use to estimate citrinin exposure based on biomarkers. *Toxicology Letters*, 282, 43-48. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2017.10.006.
4. Imaoka, T., Yang, J., Wang, L., McDonald, M. G., Afsharinejad, Z., Bammler, T. K., Van Ness, K., Yeung, C. K., Rettie, A. E., Himmelfarb, J., & Kelly, E. J. (2020). Microphysiological system modeling of ochratoxin A-associated nephrotoxicity. *Toxicology*, *444*, 152582. https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152582.
5. Kamle, M., Mahato, D. K., Gupta, A., Pandhi, S., Sharma, N., Sharma, B., Mishra, S., Arora, S., Selvakumar, R., Saurabh, V., Dhakane-Lad, J., Kumar, M., Barua, S., Kumar, A., Gamlath, S., & Kumar, P. (2022). Citrinin Mycotoxin Contamination in Food and Feed: Impact on Agriculture, Human Health, and Detection and Management Strategies. *Toxins*, *14*(2), 85. https://doi.org/10.3390/toxins14020085.
6. Jiménez-Colmenero, F., Carballo, J., & Cofrades, S. (2001). Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Science*, *59*(1), 5-13. https://doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00053-5.
7. Meulenberg EP (2012). Immunochemical Methods for Ochratoxin A Detection: A Review. *Toxins* (Basel). 4(4):244-266. https://doi.org/10.3390/toxins4040244
8. Vidal, A., Mengelers, M., Yang, S., De Saeger, S., & De Boevre, M. (2018). Mycotoxin Biomarkers of Exposure: A Comprehensive Review. Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety, 17(5), 1127-1155. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12367.

EFECTO BIOESTIMULANTE DEL SELENITO DE ZINC EN EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca Sativa*)

María Fernanda Hernández-Soltero[1], Soledad García-Morales[2*], Norma Morales-Hernández[3], Neith Aracely Pacheco-López[4], Elba Montserrat Alcázar-Valle[3], Luis Jorge Coronado-Caceres[3]

[1]Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, [2]Biotecnología Vegetal, SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, [3]Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco [4] Subsede Sureste, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
mahernandez_al@ciatej.edu.mx, *smorales@ciatej.mx

RESUMEN

Actualmente, la producción agrícola de alimentos requiere de nuevas estrategias para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos, así como, aumentar la eficiencia de los nutrientes y la tolerancia al estrés ambiental. A su vez, existe una demanda creciente en el abastecimiento de vegetales ricos en micronutrientes y compuestos bioactivos para contrarrestar los problemas que afectan a la población debido a la baja calidad nutricional de los alimentos. Los bioestimulantes minerales surgen como una alternativa para mejorar el rendimiento de los cultivos e incrementar el contenido de oligoelementos en la parte comestible de las plantas mediante la biofortificación. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bioestimulante del selenito de zinc ($ZnSeO_3$) en el crecimiento y en el rendimiento de plantas de lechuga. Los tratamientos consistieron en 10 y 20 mg/L de $ZnSeO_3$; así como, un testigo que consistió en agua. El $ZnSeO_3$ se aplicó por aspersión foliar a plántulas de lechuga de 20 días de crecimiento, previamente trasplantadas a macetas de 3 L de capacidad con sustrato comercial (60% turba 40% agrolita) en condiciones de invernadero. Los tratamientos se suministraron una vez por semana, con un total de cinco aplicaciones hasta la cosecha, 52 días después de la siembra. Cada tercer día, se aplicó la solución nutritiva Hoagland, los días restantes se regaron con agua corriente. Se determinó la altura de la planta, diámetro del tallo, longitud y volumen de la raíz, número de hojas, peso fresco y peso seco de hojas y raíz. Se estableció un diseño experimental al azar con 10 repeticiones. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se encontró que la concentración de 10 mg/L de $ZnSeO_3$ incrementó 27% la altura de la planta, 96% el volumen de la raíz, 60% la longitud de la raíz y el doble del peso fresco y seco de las hojas. Mientras que, el tratamiento con 20 mg/L aumentó 25% la altura de planta, 20% el diámetro del tallo, 50% el volumen de la raíz y 67% el peso seco de la raíz en comparación con el testigo. En el número hojas no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Bajo estas condiciones, la aplicación de $ZnSeO_3$ es una alternativa para mejorar el crecimiento y rendimiento de las plantas de lechuga al favorecer a la mayoría de las variables evaluadas. De esta manera, se contribuye a mejorar la producción y al mismo tiempo la calidad de los vegetales; potencialmente más ricos en micronutrientes como el selenio y el zinc que favorezcan la salud de los consumidores de vegetales enriquecidos con $ZnSeO_3$.

INTRODUCCIÓN

La industria de los bioestimulantes vegetales ha crecido considerablemente en el sector agrícola durante los últimos años y se ha convertido en una de las herramientas novedosas y sostenibles más importantes con potencial para mejorar el rendimiento, la calidad y la producción de los cultivos, especialmente bajo condiciones de estrés. [1,2]

Actualmente, se identifican seis categorías de bioestimulantes que incluyen: inóculos microbianos, sustancias húmicas (como ácidos húmicos y fúlvicos), hidrolizados de proteínas y aminoácidos, biopolímeros, compuestos inorgánicos y extractos de algas marinas, los cuales están disponibles comercialmente y presentan amplias aplicaciones en la agricultura. [3]

En las últimas décadas, las prácticas agrícolas han evolucionado hacia sistemas más orgánicos, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. El objetivo principal de la agricultura moderna es reducir los insumos sin comprometer la productividad ni la calidad de los cultivos. Bajo este panorama, el uso de bioestimulantes representa una forma eficiente y sostenible de complementar la nutrición de los cultivos, además de contribuir a mitigar los impactos ambientales derivados del uso excesivo de fertilizantes. [4]
Dado que en las últimas décadas se ha evidenciado un incremento en la deficiencia de micronutrientes como consecuencia de ciertas prácticas agrícolas, por ejemplo, la producción de alimentos en suelos pobres en micronutrientes, [5] se han desarrollado nuevas técnicas agrícolas como la biofortificación, que es el proceso de enriquecimiento de las partes comestibles de las plantas con nutrientes o compuestos específicos. [6] La aplicación de micronutrientes a través de la biofortificación de cultivos es una herramienta eficaz no solo para incrementar la cantidad de los micronutrientes esenciales, sino también para mejorar la biosíntesis de compuestos bioactivos. [7]

Debido a las deficiencias en el suelo, y por ende en los cultivos, la falta de micronutrientes en la población humana son un sustancial problema de salud pública. Algunas deficiencias de nutrientes, como el hierro (Fe), el zinc (Zn) y el selenio (Se) son comunes en países industrializados. [8]

En la salud humana, el Se es un oligoelemento fundamental en la nutrición, es esencial para la formación de proteínas y es cofactor de enzimas importantes. [7] En los mamíferos, el Se forma parte de, al menos, 25 selenoproteínas que cumplen funciones antioxidantes, catalíticas, antiinflamatorias, antivirales y antitumorales, por lo que, una deficiencia de este elemento provoca problemas de salud en las personas. [9] En las plantas, es un elemento no esencial, pero es considerado un elemento benéfico debido a que, en bajas concentraciones, él Se mejora el rendimiento, la actividad antioxidante y su concentración en la parte comestible de las plantas. [10]

Por otro lado, el Zn es esencial para mantener la estructura y la actividad de muchas enzimas, además de desempeñar un papel clave en la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas. Para las plantas, el Zn desempeña un papel importante en la fotosíntesis y las enzimas relacionadas, es esencial para el crecimiento y el rendimiento. [11] Además, el Zn es fundamental en la síntesis de proteínas y el metabolismo de carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos. [6]

Dada la importancia de estos elementos en la salud humana y en el metabolismo de las plantas, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bioestimulante del selenito de zinc ($ZnSeO_3$) en el crecimiento y en el rendimiento de plantas de lechuga, un importante vegetal de hoja que destaca por su valor nutrimental y nutracéutico. [12]

TEORÍA

Bioestimulante vegetal

Los bioestimulantes son un diverso grupo de compuestos que comprenden sustancias o microorganismos que tienen efectos positivos en el crecimiento, rendimiento y el metabolismo de las plantas, además tienen el potencial de mejorar la tolerancia al estrés biótico y abiótico. Según su origen, los bioestimulantes se clasifican en dos clases principales: la primera categoría incluye aquellos productos que tienen origen biológico, obtenidos de microorganismos o de la propia planta, como lo son los inóculos microbianos, sustancias húmicas (como ácidos húmicos y fúlvicos), hidrolizados de proteínas y aminoácidos, biopolímeros (como el quitosano) y extractos de algas marinas. La segunda categoría comprende aquellos productos que no tienen origen biológico como lo son los compuestos inorgánicos (aluminio (Al), cobalto (Co), sodio (Na), selenio (Se) y silicio (Si)).[3]

Bioestimulante inorgánico

Particularmente, un bioestimulante inorgánico, partiendo de la clasificación general de los bioestimulantes, es cualquier sustancia o compuestos derivados de fuentes no biológicas, [3] dentro de esta clasificación se encuentran los elementos benéficos como el aluminio (Al), cobalto (Co), sodio (Na), selenio (Se) y silicio (Si) entre otros. [13]

Selenio

El Se es un micronutriente esencial en la nutrición y salud humana, aunque no es esencial en las plantas, se ha demostrado su efectividad en el crecimiento y en la respuesta antioxidante en las plantas. No obstante, al igual que en el humano, el Se puede ser tóxico en concentraciones altas. [14] Comúnmente, los humanos obtenemos Se a través del consumo de alimentos como carne o pescado debido a que las plantas contienen una baja concentración de este oligoelemento como efecto de las bajas concentraciones de Se en el suelo. [10] Su concentración depende del tipo de roca presente, oscilando generalmente entre 0.01 y 7 mg/kg, con un promedio mundial de 0.4 mg/kg. [15]

Debido a esa baja disponibilidad del elemento, el objetivo de la biofortificación de vegetales con Se, es obtener alimentos ricos en este oligoelemento para mejorar la calidad nutricional y que ayuden a combatir los problemas de malnutrición en la población. [14]

El contenido de Se en los suelos depende del material geológico parental, entre otros factores. Se ha observado que los suelos arenosos presentan niveles más bajos de Se en comparación con los suelos orgánicos y calcáreos. El pH y el potencial redox son los principales factores que determinan las formas del selenio en el suelo, en conjunto con otras variables como el contenido de arcilla y materia orgánica. Este elemento existe en diferentes estados de oxidación, como selenato (Se^{6+}), selenito (Se^{4+}), selenio elemental (Se^{0}) y seleniuro (Se^{2-}). [15]

Selenio en los procesos bioquímicos de las plantas

Como se ha mencionado anteriormente, el hecho de que el Se no es esencial para las plantas, estas metabolizan el Se a través de la vía de asimilación de azufre (S). Esto implica la incorporación no específica de Se en los selenoaminoácidos y sus proteínas mediante la metabolización en los cloroplastos. [16]

Las formas de Se aprovechables por las plantas son el Se orgánico (SeMet, SeCys), Se^{4+} y Se^{6+}, las cuales son solubles en agua. La absorción del Se^{4+} por las plantas se da por un proceso activo mediado por transportadores de fosfato (PO_4^{3-}) y acuaporinas; mientras que, el Se^{6+} es absorbido por medio de transportadores de sulfatos (SO_4^{2}-) en la membrana plasmática. [17] El Se^{6+} es la forma preferente por las plantas y es acumulado en forma de Se orgánico entre raíces y los brotes. Por el contrario, el Se^{4+} tiende a acumularse en los tallos transportándose por el xilema. [18] Con base en lo anterior, se ha observado que la aplicación foliar de Se en las últimas etapas de crecimiento puede optimizar la absorción, translocación y distribución de Se en las partes comestibles de las plantas [19]. Adicionalmente, en general, se ha reportado que la aplicación de Se favorece algunas características fisiológicas y metabólicas de los vegetales. Particularmente en el cultivo de lechuga, en un estudio se reportó que la aplicación de Se modificó el potencial redox e incrementó la actividad enzimática de la catalasa. [20]

Zinc

En la salud humana, el Zn es esencial para mantener la estructura y la actividad de muchas enzimas; además, desempeña un papel clave en la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas. También, el Zn es fundamental en la diferenciación celular, el uso de glucosa y la secreción de insulina [21]. La mayoría de los suelos cultivables del mundo contienen cantidades suficientes de Zn para garantizar su presencia en las partes comestibles de las plantas (entre 10 y 100 mg/kg), su disponibilidad para las raíces, debido a su baja movilidad, suele ser un factor limitante en la absorción. Como resultado, se estima que aproximadamente una quinta parte de la población mundial padece deficiencia de Zn.[22]

Zinc en los procesos bioquímicos de las plantas

El Zn es un elemento esencial de muchas proteínas en las plantas, no obstante, es tóxico en exceso. [23] Para el crecimiento y el rendimiento de las plantas, el Zn desempeña un papel importante en la fotosíntesis; en la función del cloroplasto a través de la actividad dependiente de Zn de la peptidasa

SPP y la reparación del fotosistema I (PS I). Además de participar en el proceso de activación de enzimas como las ARN polimerasas y la superóxido dismutasa, así como en la síntesis de proteínas y el metabolismo de carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos. [24] En este sentido, se ha observado que la aplicación de Zn mejora el rendimiento a través de varios mecanismos, por ejemplo, mejora la biosíntesis de clorofila, desencadena la actividad fotosintética y la síntesis de auxina que conducen a un mejor crecimiento y desarrollo de las plantas. [25]

Por lo anterior, la fertilización de cultivos con fertilizantes a base de Zn, sea por aplicación al suelo o foliar, se ha convertido en una práctica cada vez más común en suelos agrícolas deficientes de Zn ya que este limita la productividad de los cultivos. [8] Particularmente, se ha reportado que el selenito de zinc ($ZnSeO_3$) aplicados al suelo y/o foliares tienen efectos positivos en la biofortificación de diferentes cultivos alimenticios [8,11].

Biofortificación mineral agronómica

En primer lugar, se define como biofortificación al proceso de enriquecimiento de alimentos con nutrientes benéficos. En los vegetales, la biofortificación es una herramienta eficaz para mejorar el contenido de compuestos benéficos en la parte comestible de las plantas. [6]

Existen diferentes estrategias para la obtención de vegetales biofortificados, entre ellas se encuentran enfoques agronómicos y genéticos, en el último caso se puede realizar ya sea a través de mejoramiento convencional o por métodos de ingeniería genética para la generación de transgénicos, en ambos casos, el objetivo es aumentar, en la porción comestible, el contenido de minerales u otros compuestos específicos relacionados con la salud. [26]

Especialmente, la biofortificación mineral agronómica consiste en incrementar las concentraciones biodisponibles del elemento suministrado en las partes comestibles de las plantas cultivadas. [27] Este tipo de enfoques generalmente se basan en el suministro de fertilizantes minerales y/o en la mejora de la movilización y solubilización de los elementos minerales en la rizosfera. [26]

Cuando se trata de minerales que no se translocan fácilmente hacia los tejidos comestibles, como ocurre en cultivos que se cultivan en suelo o con minerales de baja movilidad, una alternativa viable es la fertilización foliar. Esta estrategia puede aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes, minimizar el impacto ambiental negativo y potenciar los beneficios para la salud del consumidor. [28]

El papel de los vegetales en la salud humana

Los vegetales constituyen una parte fundamental de la dieta humana, ya que proporcionan la mayoría de las calorías, nutrientes y compuestos bioactivos necesarios para mantener una vida saludable y prevenir enfermedades. Las verduras son parte de una buena alimentación basada en plantas y proporcionan, particularmente, fibra dietética, fitoquímicos (como vitaminas, antioxidantes) y minerales, [6] por lo que, una ingesta inadecuada de estos puede llevar a la llamada hambre oculta o malnutrición, término que se ha utilizado para describir a las dietas humanas que son adecuadas en calorías, pero carecen de vitaminas y/o elementos minerales. [26]

Efecto bioestimulante y biofortificación de lechuga con Se y Zn

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las especies de cultivo hortícola más consumidas a nivel mundial y está disponible comercialmente durante todo el año, cultivándose en campos abiertos, invernaderos o en fábricas de plantas con luz artificial. [29] Es un vegetal de hoja importante ya que representa una fuente dietética importante de antioxidantes y compuestos bioactivos [30] baja en calorías, grasas y sodio, rica en fibra, folato y vitamina C, así como en minerales esenciales como el hierro. [29]

Se han realizado diversos estudios sobre biofortificación con Se en sus diferentes formas, en el cultivo de lechuga. Por ejemplo, en condiciones de salinidad, se encontró que algunos de los efectos de la biofortificación con este mineral son el aumento en el contenido de clorofila, el peso de la cabeza, el área foliar, el peso seco de las hojas y la concentración de Se. [31] En otro estudio donde

se evaluó la biofortificación combinada de lechuga en solución con yodo, Se y Zn se obtuvo un aumento significativo en las concentraciones de Se y Zn sin un efecto significativo en la composición elemental esencial y no esencial. [32] En otro trabajo se evaluó la aplicación de Zn en la biofortificación de lechuga, donde la dosis óptima (75 µM de $ZnSO_4$) maximizó el rendimiento y la calidad nutracéutica, así como la concentración del elemento, por el contrario, dosis más altas de Zn disminuyeron la biosíntesis de compuestos bioactivos. [33] En otro trabajo se estudió la biodisponibilidad de Cu, Fe, Mn, Mo, Se y Zn de plantas de lechuga enriquecidas con Se^{6+} y Se^{4+}, donde se encontró que la biofortificación con Se^{6+} favorece a una mayor absorción de Se por parte de la planta, mientras que la biofortificación con Se^{4+}, resulta en una mayor biodisponibilidad de Se (22%). [34]

En otro estudio se evaluó la biofortificación agronómica con Zn de dos diferentes cultivares de lechuga. La lechuga “Vanda” mostró el mayor diámetro y masa fresca, mientras que “Saladela” presentó la mayor cantidad de hojas. A una concentración de Zn de 2.4 mg/L, se registraron niveles de Zn en hojas (733.3 mg/kg) y raíces (2441 mg/kg), con acumulaciones de 931.66 y 4890 mg por planta, respectivamente.[35] En otro trabajo se evaluó la biofortificación de plántulas de lechuga con selenato de sodio (Na_2SeO_4) donde se obtuvo una mejora en el valor nutritivo por el aumento de Se sin reducir la biomasa de las hojas, lo que resultó en un mayor contenido de Se en las hojas y una mayor capacidad antioxidante [36].

Es evidente que, en las últimas décadas, en la agricultura y en los sistemas de producción, ha crecido el interés por el uso de bioestimulantes para promover el crecimiento de las plantas, el rendimiento y la calidad de los cultivos debido a factores ambientales que amenazan la seguridad alimentaria, por lo que, es fundamental implementar estrategias sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para la producción de alimentos.

Con lo expuesto previamente y bajo el panorama relevante de estos minerales en la salud humana y en el metabolismo de las plantas, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bioestimulante del selenito de zinc ($ZnSeO_3$) en el crecimiento y en el rendimiento de plantas de lechuga, y a su vez, potencializar el contenido de micronutrientes como el Se y el Zn mediante el implemento de la biofortificación, una herramienta eficaz que consiste en el enriquecimiento de los alimentos con nutrientes específicos para el beneficio de los consumidores. Con esto se busca ampliar el campo en la innovación de productos bioestimulantes para un beneficio en la eficiencia de los cultivos y en su calidad nutrimental.

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal

Se realizó un experimento donde se evaluó el efecto bioestimulante del selenito de zinc ($ZnSeO_3$) en el crecimiento y rendimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), variedad italiana Starfighter, las semillas se obtuvieron de forma comercial (ITSCO®).

Producción de plántulas

Para la producción de las plántulas, las semillas de lechuga se sembraron en bandejas de germinación de poliestireno de 50 cavidades, colocando una semilla por cavidad a una profundidad de 1 cm con sustrato comercial (60% turba 40% agrolita) preparado previamente con una humedad a capacidad de campo. Las charolas se mantuvieron en condiciones de incubación semi controladas a 25 °C con un fotoperiodo de 14 h de luz y 10 h de oscuridad aproximadamente, el riego se hizo de forma manual tres veces por semana hasta su traslado a invernadero.

Experimento en invernadero

Las lechugas se trasplantaron a los 20 días después de la siembra en macetas individuales de poliestireno de una capacidad de 3 L con sustrato comercial (60% turba 40% agrolita) y se llevaron a invernadero, considerando 10 macetas por tratamiento. Se aplicó una solución nutritiva (Hoagland) cada tercer día, los restantes se regó con agua según los requerimientos de las plantas.

Tratamientos
Los tratamientos aplicados consistieron en 10 y 20 mg/L de $ZnSeO_3$, así como un testigo que consistió en agua destilada. Se aplicaron por aspersión foliar a las plántulas de lechuga suministrados una vez por semana, con un total de cinco aplicaciones, hasta terminar su ciclo vegetativo, 52 días después de la siembra.

Determinación de variables
La evaluación de las plantas se hizo a los 52 días después de la siembra. En esta etapa se determinó la altura de la planta (desde la base de la planta hasta la última hoja), longitud de raíz (desde la base del tallo hasta la punta de la raíz); empleando como instrumento una cinta métrica para las dos variables mencionadas, diámetro de tallo; empleando un vernier, número de hojas, volumen de la raíz; lo cual se midió sumergiendo la raíz limpia en un recipiente con un volumen conocido de agua y registrando el aumento del nivel de agua (mL), así como peso fresco y seco de hojas y raíz; utilizando una balanza de precisión (Precisa XB 1200 C) para capturar el peso y obtener el rendimiento. Posteriormente se llevaron a un horno de secado (Yamato DX402C) a 70°C durante 72 h. Finalmente, se registró el peso seco de las muestras de hojas y raíz con ayuda de la balanza de precisión.

Análisis estadístico
Para el análisis de los datos se estableció un diseño experimental al azar con 10 repeticiones de cada tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Lo anterior se realizó en el programa estadístico STATGRAPHICS 19®.

RESULTADOS

Con la aplicación foliar de $ZnSeO_3$, se encontró que la concentración de 10 mg/L tuvo un mayor efecto en la mayoría de las variables; incrementó 27% la altura de la planta en comparación con el testigo (19.2 cm), con un promedio de 24.55 cm (Figura 1a). Mientras que, el tratamiento con 20 mg/L $ZnSeO_3$ aumentó 25% la altura de planta; con un promedio de 24.05 cm, estadísticamente similar al valor obtenido en 10 mg/L y significativamente superior al testigo (Figura 1a). De igual manera, la aplicación foliar de 10 mg/L de $ZnSeO_3$ aumentó 96% el volumen de la raíz (obteniendo una diferencia significativa en comparación con el testigo), con un promedio de 12.33 mL (Figura 1b). El volumen de la raíz aumentó un 50% con la aplicación de 20 mg/L; con un promedio de 10.5 mL, valor estadísticamente similar a 10 mg/L y significativamente diferente al testigo (Figura 1b).

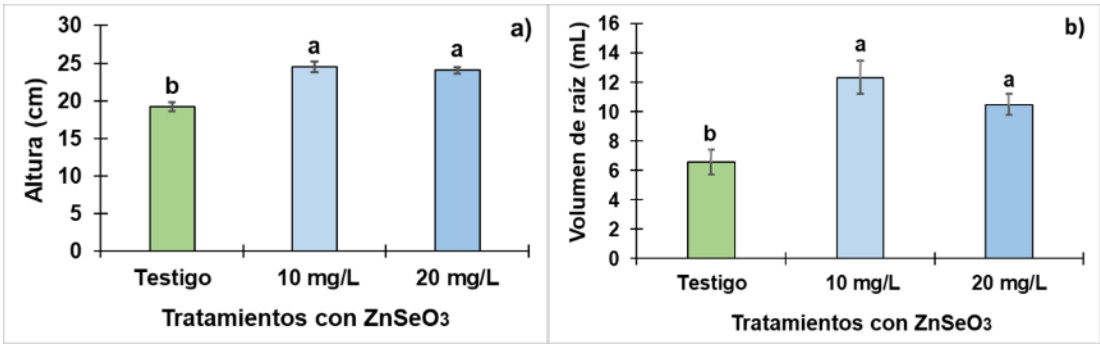


Figura 1. Altura de planta de lechuga (a) y volumen de raíz de planta de lechuga (b) tratadas con diferentes concentraciones de selenito de zinc ($ZnSeO_3$). Las líneas sobre las barras indican el valor del error estándar de la media (n=10). Letras distintas muestran diferencias estadísticas entre los tratamientos, de acuerdo con la prueba de Tukey (α= 0.05).

La siguiente imagen muestra las plantas y raíces de lechuga tratadas con los diferentes tratamientos, en donde se aprecia una similitud en el tamaño de las plantas tratadas con $ZnSeO_3$ (10 y 20 mg/L) y una diferencia notable con el testigo (figura 1a). Las raíces de las plantas tratadas con $ZnSeO_3$ de

igual manera mostraron un efecto notable en la longitud en comparación con el testigo, encontrando una mayor longitud en el tratamiento 10 mg/L (figura 1b).

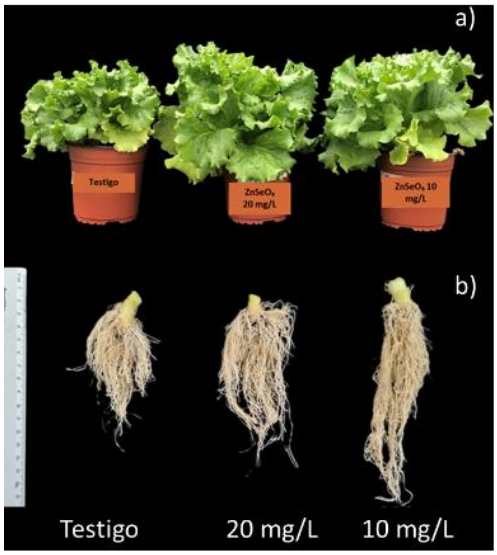


Figura 2. Imagen comparativa de la altura (cm) de plantas y la longitud de la raíz de lechuga en el estadio de encabezamiento de su ciclo de crecimiento tras la aplicación de los tratamientos evaluados (Testigo, $ZnSeO_3$ 20 y 10 mg/L).

En el tratamiento de 10 mg/L se encontró un aumento del doble del peso fresco y seco de las hojas (109 y 113% respectivamente) en comparación con el testigo, con valores de 173.33 y 9.23 g, respectivamente (Figura 3a y 3b). Esta concentración también incrementó 60% la longitud de la raíz, obteniendo un valor de 14.88 cm, estadísticamente mayor que los demás tratamientos (testigo y $ZnSe0_3$ 20 mg/L) (Figura 3c). Por otro lado, la concentración 20 mg/L aumentó 67% el peso seco de la raíz; con un valor estadísticamente mayor a los demás tratamientos (0.57 g) (Figura 3d).

Se destaca de forma general, que la aplicación de $ZnSeO_3$ a 10 mg/L mejoró el crecimiento y rendimiento de las plantas de lechuga al favorecer a la mayoría de las variables evaluadas; principalmente el volumen y longitud de la raíz (Figura 1b y figura 3c), el peso seco de las hojas (Figura 3b) y el peso fresco de la raíz (Tabla 1), mostrando aumentos significativos en comparación con el testigo. Se encontraron tendencias interesantes en algunas variables como el peso seco de la raíz, donde un aumento en la concentración de $ZnSeO_3$ (20 mg/L) aumentó el peso seco de la raíz. Contrario a la longitud, donde un aumento en la concentración disminuyó la longitud, y una concentración más baja de $ZnSeO_3$ (10 mg/L) favoreció el crecimiento de la raíz (Figura 3 c y d).

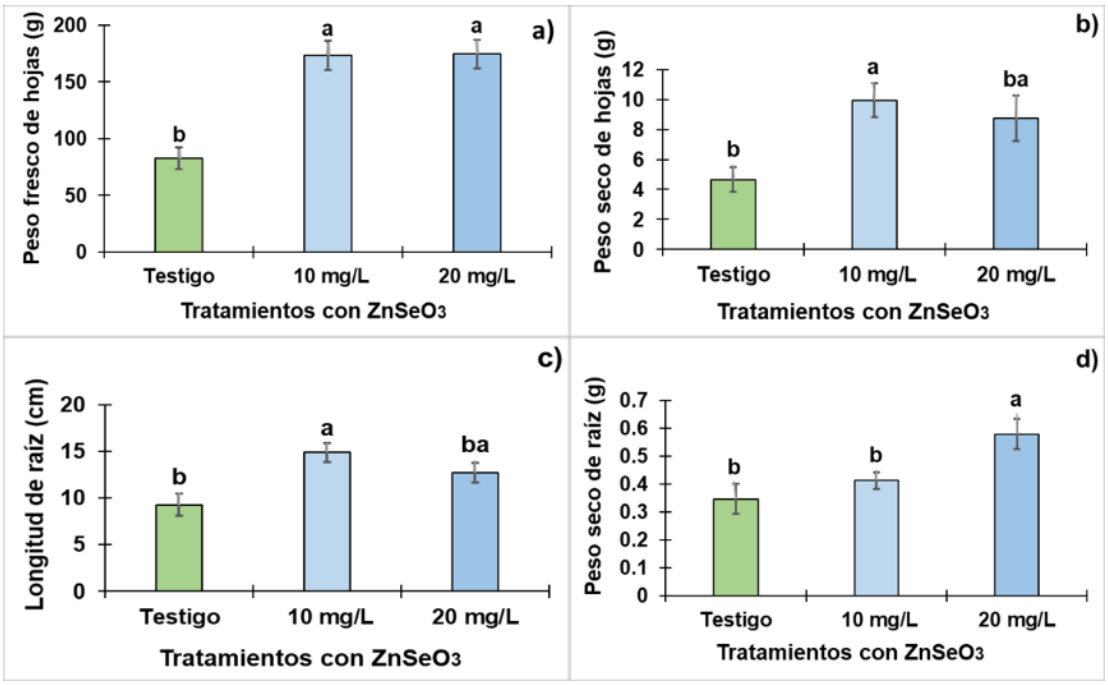


Figura 3. Peso fresco de hojas (a), peso seco de hojas (b), longitud de raíz (c) y peso seco de raíz (d) de planta de lechuga tratadas con la aplicación de diferentes concentraciones de selenito de zinc ($ZnSeO_3$). Las líneas sobre las barras indican el valor del error estándar de la media (n=10). Letras distintas muestran diferencias estadísticas entre los tratamientos, de acuerdo con la prueba de Tukey (α= 0.05).

En cuanto al diámetro de tallo, el tratamiento con la concentración 20 mg/L aumentó 20%, siendo estadísticamente similar al tratamiento 10 mg/L y estadísticamente diferente al testigo (Tabla 1). De igual manera, en el peso fresco de la raíz se encontró un aumento significativo de ambas concentraciones del $ZnSeO_3$, con 89 y 87% de aumento respectivamente, en comparación al testigo (Tabla 1). En el número hojas no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 1).

Tabla 1. Variables de crecimiento (diámetro de tallo, peso fresco de raíz y numero de hojas) evaluadas en plantas de lechuga.

Variable	**Tratamiento**		
	Testigo	$ZnSeO_3$ 10 mg/L	$ZnSeO_3$ 20 mg/L
Diámetro de tallo (mm)	8.47±.039 b	9.98±0.44 a	10.23±0.38 a
Peso fresco raíz (g)	4.87±0.83 b	9.23±1.31 a	9.11±0.74 a
Número de hojas	30.89±0.86 a	28.6±1.10 a	30±0.63 a

Medias (n=10) ± error estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (α= 0.05).

CONCLUSIONES

Con lo expuesto anteriormente, se concluye que la dosis óptima de $ZnSeO_3$ para promover el crecimiento vegetal fue de 10 mg/L, ya que proporcionó los mejores resultados en variables como la altura, el volumen y longitud de la raíz, el peso seco de las hojas y el peso fresco de la raíz. La mejora en estas variables es importante ya que reflejan un mejor desarrollo de las plantas bajo estas condiciones (10 mg/L). Esto confirma que concentraciones bajas de $ZnSeO_3$ favorecen el crecimiento

y desarrollo de lechuga durante su ciclo completo de crecimiento, y concentraciones altas tienden a disminuir algunas variables (peso seco de hojas y longitud de raíz). De esta manera, se puede contribuir a mejorar la producción y al mismo tiempo la calidad de los vegetales; potencialmente más ricos en micronutrientes como el selenio y el zinc y que favorezcan la salud de los consumidores de vegetales enriquecidos con $ZnSeO_3$.

BIBLIOGRAFÍA

1. Del Buono, D. Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. *Science of The Total Environment* 751, 141763 (2021).
2. De Pascale, S., Rouphael, Y. & Colla, G. Plant biostimulants: innovative tool for enhancing plant nutrition in organic farming. *Eur J Hortic Sci* 82, 277–285 (2018).
3. Shahrajabian, M. H., Nikolaos-Polyzos, C. C. & Petropoulos, S. A. Biostimulants application: A low input cropping management tool for sustainable farming of vegetables. *Biomolecules* 11, (2021).
4. Bulgari, R., Cocetta, G., Trivellini, A., Vernieri, P. & Ferrante, A. Biostimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture* 31, 1–17 (2015).
5. Lal, R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Secur* 1, 45–57 (2009).
6. Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C. & Giuffrida, F. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods* vol. 10 Preprint at https://doi.org/10.3390/foods10020223 (2021).
7. Gaucin-Delgado, J. M. *et al.* La biofortificación con selenio mejora los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en chile jalapeño. *Rev Mex De Cienc Agric* 12 (8), (2021).
8. Lončarić, Z., Ivezić, V., Kerovec, D. & Rebekić, A. Foliar Zinc-Selenium and Nitrogen Fertilization Affects Content of Zn, Fe, Se, P, and Cd in Wheat Grain. *Plants 2021, Vol. 10, Page 1549* 10, 1549 (2021).
9. Avery, J. & Hoffmann, P. Selenium, Selenoproteins, and Immunity. *Nutrients* 10, 1203 (2018).
10. Preciado-Rangel, P. *et al.* Biofortification with selenium increases bioactive compounds and antioxidant capacity in tomato fruits. *Revista terra latinoamericana* 39, (2021).
11. Huang, S. *et al.* Interactive Effects between Zinc and Selenium on Mineral Element Accumulation and Fruit Quality of Strawberry. *Agronomy* 13, 2453 (2023).
12. Hameed, M. K. *et al.* Quantification of total polyphenols, antioxidants, anthocyanin and secondary metabolites by UPLC VION IMS QTOF MS/MS analysis in green and red lettuce cultivars. *Sci Hortic* 315, (2023).
13. León-Morales, J. M. *et al.* Panorama actual de los bioestimulantes agrícolas. in *Tópicos de Herramientas Biotecnológicas para el Desarrollo Agrícola Topics of Biotechnological Tools for Agricultural Development* (ed. Castañeda Nava José Juvencio) 14–20 (Castañeda Nava, José Juvencio, Guadalajara-México, 2021).
14. Schiavon, M., Nardi, S., dalla Vecchia, F. & Ertani, A. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant Soil* 453, 245–270 (2020).
15. Lopes, G., Ávila, F. W. & Guilherme, L. R. G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Ciência e Agrotecnologia* 41, 605–615 (2017).
16. Terry, N., Zayed, A. M., De Souza, M. P. & Tarun, A. S. *Selenium in higher plants*. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol* vol. 51 (2000).
17. Garduño-Zepeda, A. M. & Márquez-Quiroz, C. Use of selenium in crop production. Review. *ITEA Informacion Tecnica Economica Agraria* 114, 327–343 (2018).
18. Li, H. F., McGrath, S. P. & Zhao, F. J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. *New Phytologist* 178, 92–102 (2008).
19. Deng, X. *et al.* Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages. *Field Crops Res* 211, 165–171 (2017).
20. López-Gutiérrez, M. de L. *et al.* Selenio y su efecto en el estado antioxidante y la composición mineral de la lechuga* Selenium and its effect on antioxidant status and mineral composition of lettuce. *Rev Mex De Cienc Agric* 12, 2257–2262 (2015).

21. Roohani, N., Hurrell, R., Kelishadi, R. & Schulin, R. Zinc and its importance for human health: An integrative review. *Journal of Research in Medical Sciences* (2013).
22. White, P., Pongrac, P., Sneddon, C., Thompson, J. & Wright, G. Limits to the Biofortification of Leafy Brassicas with Zinc. *Agriculture* 8, 32 (2018).
23. Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I. & Lux, A. Zinc in plants: Tansley review. *New Phytologist* vol. 173 677–702 Preprint at https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x (2007).
24. Sharma, A., Patni, B., Shankhdhar, D. & Shankhdhar, S. C. Zinc – An Indispensable Micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 19, 11–20 (2013).
25. Chattha, M. U. *et al.* Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Front Plant Sci* 8, (2017).
26. White, P. J. & Broadley, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182, 49–84 (2009).
27. Hermosillo-Cereceres, M. A. Biofortificación con selenio: influencia en la capacidad antioxidante y calidad nutricional del frijol. (Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Chihuahua, 2012).
28. Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K. & Yan, D. Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 104–118 (2021).
29. Yang, X., Gil, M. I., Yang, Q. & Tomás-Barberán, F. A. Bioactive compounds in lettuce: Highlighting the benefits to human health and impacts of preharvest and postharvest practices. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* vol. 21 4–45 Preprint at https://doi.org/10.1111/1541-4337.12877 (2022).
30. Yang, X. *et al.* A novel integrated non-targeted metabolomic analysis reveals significant metabolite variations between different lettuce (Lactuca sativa. L) varieties. *Hortic Res* 5, (2018).
31. Shalaby, T. *et al.* Selenium fortification induces growth, antioxidant activity, yield and nutritional quality of lettuce in salt-affected soil using foliar and soil applications. *Plant Soil* 421, 245–258 (2017).
32. Sahin, O. Combined biofortification of soilless grown lettuce with iodine, selenium and zinc and its effect on essential and non-essential elemental composition. *J Plant Nutr* 44, 673–678 (2021).
33. Preciado-Rangel, P. *et al.* Zinc biofortification improves yield, nutraceutical quality and antioxidant capacity in lettuce. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24, (2021).
34. Nascimento da Silva, E. & Cadore, S. Bioavailability Assessment of Copper, Iron, Manganese, Molybdenum, Selenium, and Zinc from Selenium-Enriched Lettuce. *J Food Sci* 84, 2840–2846 (2019).
35. Lima, B. M. de *et al.* Agronomic biofortification with zinc in hydroponically cultivated lettuce. *Aust J Crop Sci* 195–205 (2023) doi:10.21475/ajcs.23.17.02. p. 3786.
36. Puccinelli, M., Malorgio, F., Pintimalli, L., Rosellini, I. & Pezzarossa, B. Biofortification of Lettuce and Basil Seedlings to Produce Selenium Enriched Leafy Vegetables. *Horticulturae* 8, 801 (2022)

EVALUACIÓN FUNCIONAL DE LOS BIOPÉPTIDOS OBTENIDOS MEDIANTE UN PROCESO DE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA A PARTIR DE LAS PROTEÍNAS DE LA QUINOA

Aaron Montes-Acevedo, Alejandra Gutiérrez-Aguirre, José de Jesús Flores-Sierra y Raúl Reyes-Bautista*

Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón.
*raul.rb@purisima.tecnm.mx.

RESUMEN

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), un pseudocereal andino cultivado desde hace más de 7 000 años, contiene proteínas que pueden generar péptidos bioactivos con posibles beneficios para la salud. Este estudio evaluó el efecto de la digestión gastrointestinal simulada (DGS) sobre las proteínas de quinoa y sus propiedades biofuncionales. Se preparó un aislado de proteína a partir de harina de quinoa, que luego fue sometido a hidrólisis enzimática. Los resultados mostraron un grado máximo de hidrólisis del 49.2 %, y se identificaron cuatro fracciones proteicas principales, de las cuales solo una (Q-III) presentó actividad inhibitoria frente a las enzimas DPP-IV y ECA, implicadas en la diabetes y la hipertensión, respectivamente. Esto sugiere que los hidrolizados proteicos de quinoa podrían tener un uso potencial como agentes nutracéuticos, con propiedades antidiabéticas, antihipertensivas y antioxidantes.

INTRODUCCIÓN

Los hidrolizados proteínicos mejoran diversas propiedades tecnofuncionales, como una baja viscosidad, mayor capacidad de emulsión, dispersión y alta solubilidad, lo que brinda ventajas en su aplicación en diversos productos alimenticios en comparación con las proteínas originales. No obstante, en los últimos años se ha evidenciado que la optimización del proceso de hidrólisis enzimática también destaca ciertas propiedades funcionales, como actividades antihipertensivas, antidiabéticas, antioxidantes y antimicrobianas, entre otras. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo mejorar el proceso de hidrolisis aplicando un sistema de digestión gastrointestinal simulada en las proteínas del grano de amaranto.
.

TEORÍA

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) es una planta con flores de la familia Amaranthaceae. Desde el punto de vista botánico, la quinoa se asigna a la familia Chenopodiceae y su nombre botánico es Chenopodium quinoa, Willd. La quinoa es una planta anual ginomonoica con un tallo erecto, que lleva hojas alternas de colores variados desde el blanco, amarillo o marrón claro hasta el rojo debido a la presencia de β-cianinas. La mayoría de las variedades de quinua difieren comúnmente en su morfología y fenología y en la composición química de sus tejidos [2]. La quinoa no es un verdadero grano de cereal: es un llamado pseudocereal, que es dicotiledóneo.

La semilla de quinoa comprende varias capas, por ejemplo, pericarpio, cubierta de la semilla y perispermo de afuera hacia adentro, y puede ser cónica, cilíndrica o elipsoidal, con saponinas concentradas en el pericarpio. En la semilla madura, el endospermo está presente sólo en la región micropilar de la semilla y consiste en uno o dos tejidos de capas celulares que rodean el eje hipocótilo-radícula del embrión.

La semilla de quinoa comprende varias capas, por ejemplo, pericarpio, cubierta de la semilla y perispermo de afuera hacia adentro, y puede ser cónica, cilíndrica o elipsoidal, con saponinas concentradas en el pericarpio. En la semilla madura, el endospermo está presente sólo en la región

micropilar de la semilla y consiste en uno o dos tejidos de capas celulares que rodean el eje hipocótilo-radícula del embrión.
Los péptidos bioactivos son producto de la hidrólisis por enzimas digestivas gastrointestinales (pepsina, tripsina y quimotripsina), o por in vitro productores con enzimas, temperatura o pH. Suelen estar compuestos por dos y hasta 30 aminoácidos, con algunas excepciones, como la Lunasina (péptido derivado de proteínas de cereales y soja) que tiene 43 aminoácidos. Otras características de los péptidos bioactivos son la presencia de aminoácidos hidrofóbicos en sus secuencias, carga positiva y resistencia a la digestión por proteasas y peptidasas, y una prolina C terminal. Los péptidos pequeños con un dipéptido de prolina-prolina en su terminal C son los más resistentes a la degradación por proteasas y peptidasas de estómago, páncreas o intestino. Los péptidos grandes (con 6 o más) suelen estar activos fuera del epitelio intestinal. [3], [4], [5], [6], [7].

El hidrolizado de proteínas y los péptidos de quinoa podrían contribuir a reducir el riesgo asociado a las enfermedades relacionadas con el área cardiometabólica al ejercer una actividad antidiabética, antihipertensiva e hipolipidémica, proporcionar protección contra el estrés inflamatorio y oxidativo, y servir como compuestos citotóxicos contra los microbios y las células cancerosas.

PARTE EXPERIMENTAL

Las semillas de quinoa se secarán en un horno de aire caliente a 40 °C durante 3 h. Las semillas secas primero molieran hasta obtener un polvo fino (harina de quinua) utilizando un molinillo eléctrico IKA A10 basic y se tamizaran a través de un tamiz de tamaño de poro de 0.25 mm. El aislado de proteína se obtendrá a partir de la harina de semilla de quinua de acuerdo con el método descrito por Mudgil et al. [4]. La harina de quinoa inicialmente se desgrasará dos veces utilizando hexano en una proporción de 1:5 durante 2 h, la grasa se extraerá mediante centrifugación a 4400x g, 4 °C durante 10 min. La harina resultante se secará a 40 °C durante 12 h para evaporar el hexano residual y luego la harina se mezclará con NaOH 0.015 M en una proporción de 1:10 (Harina: NaOH; p/v) y se agitará durante 2 h temperatura ambiente (24 ± 2 °C). Luego, la suspensión resultante se almacenará a 4 °C durante 24 h. Posteriormente, la suspensión se homogeneizará utilizando el homogeneizador T 25 digital ULTRA-TURRAX® (IKA®-Werke GmbH Co., Alemania), seguido de centrifugación dos veces a 4400x g durante 30 min y luego nuevamente a 10 000x g durante 20 min a 4 °C. El sobrenadante se filtrará a través de papel de filtro Whatman n.º 1 y las proteínas de quinoa separarán por precipitación isoeléctrica mediante la adición de HCl 3.2 M hasta alcanzar un pH de 4.2. Las proteínas precipitadas se recuperarán mediante centrifugación doble a 10 000 x g durante 10 min a 4 °C. Los precipitados resultantes se lavarán con agua destilada, se agitarán en vórtex y se resuspenderán en agua doblemente desionizada para obtener una suspensión de aislado de proteína de quinoa (APQ). El pH de la suspensión se ajustará a pH 7 utilizando NaOH I M para solubilizar las proteínas y, tras la disolución completa de las proteínas, la suspensión con un contenido de proteína del 44 % se almacenará a -20 °C hasta su posterior análisis.

RESULTADOS

Se encontró que el máximo GH obtenido fue de 49.2 ± 2.12 % para el sistema de 90 min (Pe) y 60 min (Pa) (Fig. 1), se pudo apreciar que el aumento del grado de hidrólisis no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en los tiempos mencionados.

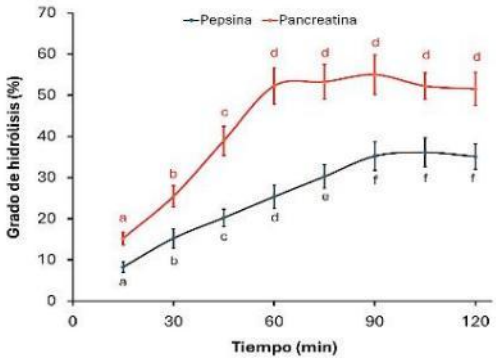


Figura 1. Grado de hidrolisis sobre las proteínas de quinoa durante DGS .

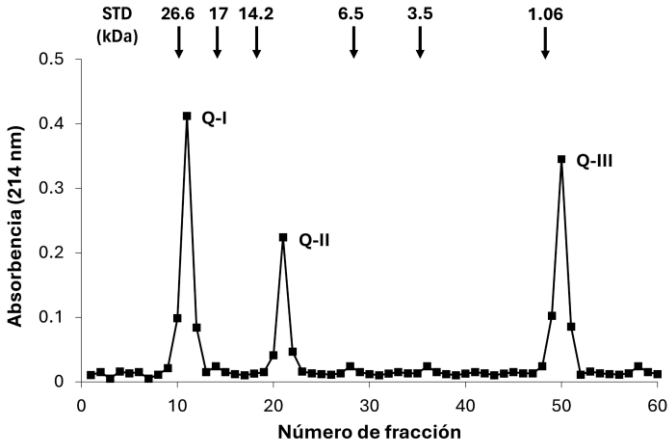


Figura 2. Perfil de elusión cromatográfico por exclusión molecular (SCE, Sephadex G-50) para los hidrolizados obtenidos mediante DGS .

La purificación parcial mediante SCE, revelo la presencia de 4 principales fracciones (Fig. 2): Q-I (26.2 kDa), Q-II (13.2 kDa) y Q-III (1.03 kDa), de los cuales solo Q-3 presento actividad inhibitoria de la DPP-IV y la ECA, los valores de IC50 fueron de 2.56 ± 0.1 mg/mL y 5.34 ± 0.27 mg/mL.

CONCLUSIONES

La evaluación de modelos de digestión gastrointestinal simulada, apoya la teoría sobre el consumo de este tipo de pseudocereales, como potenciales alimentos nutracéuticos ya que en el presente estudio se demostró que sus hidrolizados enzimáticos podrían ejercer un efecto regulador a nivel sistémico y ser utilizados con acción terapéutica como coadyuvantes en el control de enfermedades como la diabetes y la hipertensión.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian el potencial de la quinoa como fuente de compuestos bioactivos, específicamente péptidos derivados de su fracción proteica, que podrían desempeñar un papel importante en la prevención y manejo de enfermedades crónicas no transmisibles, especialmente aquellas del ámbito cardiometabólico como la diabetes tipo 2 y la hipertensión arterial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mudgil, P., Kilari, B. P., Kamal, H., Olalere, O.A., FitzGerald, R.J., Gan, C.Y., Maqsood, S., (2020) Multifunctional bioactive peptides derived from quinoa protein hydrolysates: Inhibition

of α-glucosidase, dipeptidyl peptidase-IV and angiotensin I converting enzymes. Journal of Cereal Science. 103130.

2. H.D Bertero, A.J de la Vega, G Correa, S.E Jacobsen, A Mujica, “Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials”, Field Crops Res., Vol 89, 2-3, 2004, pp. 299-318.
3. De Carvalho Oliveira, L., Martinez-Villaluenga, C., Frias, J., Elena Cartea, M., Francisco, M., Cristianini, M., & Peñas, E. (2024). High pressure-assisted enzymatic hydrolysis potentiates the production of quinoa protein hydrolysates with antioxidant and ACE-inhibitory activities. Food Chemistry, 447, 138887.
4. Galvez, A. F., N. Chen, J. Macasieb, and O. Ben. 2001. Chemopreventive property of a soybean peptide (lunasin) that binds to deacetylated histones and inhibits acetylation. Cancer Research 61 (20):7473–78.
5. Korhonen, H., and A. Pihlanto. 2003. Food-derived bioactive peptidesopportunities for designing future foods. Current Pharmaceutical Design 9 (16):1297–308.
6. Panchaud, A., M. Affolter, and M. Kussmann. 2012. Mass spectrometry for nutritional peptidomics: How to analyze food bioactives and their health effects. Journal of Proteomics 75 (12):3546–59.
7. Perez Espitia, P. J., N. De Fatima Ferreira Soares, J. S. Dos Reis Coimbra, N. J. De Andrade, R. Souza Cruz, A. Medeiros, and E. Antonio. 2012. Bioactive peptides: Synthesis, properties, and applications in the packaging and preservation of food. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 11 (2):187–204.
8. Maestri, E., M. Marmiroli, and N. Marmiroli. 2016. Bioactive peptides in plant-derived foodstuffs. Journal of Proteomics 147:140–155.

OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE OXIDO DE COBRE POR MÉTODO DE REDUCCIÓN QUÍMICA PARA SU USO COMO AGENTE ANTIMICROBIANO

María Teresa Fuentes Romero, Jesús Nicolás Bermúdez, Yocelin Sharis Torre Angeles, Mariana Nemesio Flores, Guadalupe Cruz Lemus Y Rodrigo Salazar Salazar.

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez.
Teresa.Fuentes@Utfv.Edu.Mx

RESUMEN

En el presente trabajo se describe la síntesis de nanopartículas de cobre (NP's CuO) por el método de reducción química, a partir de una sal de sulfato de cobre (CuSO4). Las NP's de CuO han tenido un gran interés durante los últimos años debido a sus características y excelentes propiedades físicas y químicas que se diferencian de las partículas de mayor tamaño. Los reactivos que se utilizaron para preparar las NP's CuO fueron hidróxido de sodio (NaOH), el citrato de sodio (Na3C6H5O7) y por último el ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$). Las NP's CuO se caracterizaron con las técnicas UV-Vis, con una absorción a longitudes de onda 350 nm. El espectro de 350 nm para nanopartículas de óxido de cobre (Cu) suele indicar un color verde-azulado. Esto se debe a que las nanopartículas de cobre tienen una banda de absorción en el rango de 300-400 nm, lo que les da un color verde-azulado y el tamaño de la nanopartícula, las características de la absorción dependen en gran medida de la naturaleza del metal, así como el tamaño y la forma de la Np metálico. Por lo cual concluimos que las excelentes propiedades fisicoquímicas de las NP's CuO obtenidas, junto con la simplicidad y eficacia del método de síntesis, sugieren su aplicación en campos como la antimicrobiología, la óptica y la nanotecnología.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas de óxido de cobre son ampliamente utilizadas o aclamadas por los investigadores debido a sus amplias aplicaciones o sus múltiples propiedades antibacterianas, ópticas, antimicrobianas [2] y sobre todo control de plagas [1]. Otra ventaja es su valor económico a comparación de las NP's de Au, Ag, Pt que siendo estos metálicos y similares en propiedades suelen ser más costosos y menos amigables con el entorno.[4]

Para obtener el mayor aprovechamiento de estas nanopartículas y sus propiedades antibacterianas se utilizará para la elaboración de sanitizantes para su uso en diferentes áreas ya sea de la salud o lugares comunes, logrando una mejora tanto en calidad-precio y el menor deterioro ambiental, dado que los sanitizantes comerciales suelen ser dañinos ya que muchos de ellos pueden generar compuestos tóxicos al ambiente llegando afectar a los seres vivos incluso llegando a ser cancerígenos, corrosivos y/o volátiles aumentando su en pandemia. Las nanopartículas son más eficaces para la elaboración de sanitizantes debido a su pequeña escala de acción donde es más eficiente en la eliminación de microrganismos y más durable a nivel de macroprotección.[3]

TEORÍA

Las nanopartículas metálicas han adquirido gran relevancia en los últimos años debido a sus propiedades fisicoquímicas, ópticas y su gran aplicación en área ambiental, nanomedicina y sensores. Entre los metales más estudiados se encuentra el cobre, el cual es una alternativa económica frente a metales nobles como el oro yo la plata, y posee propiedades antimicrobianas y catalíticas destacadas.

La síntesis de nanopartículas de cobre puede realizarse mediante distintos métodos físicos, químico y biológicos. Este trabajo, se emplea el método reducción química en solución acuosa, el cual consiste en la reducción de iones cúpricos (CU^{2+}) provenientes del sulfato de cobre metálico (Cu^{0}) que procede una nucleación y crecen hasta formar las nanopartículas.

El ácido ascórbico actúa como agente reductor, transformando los iones (CU^{2+}) a (Cu^{0}) mediante una transferencia de electrones. Demas posee propiedades antioxidantes que ayudan a evitar la oxidación de las nanopartículas oxidadas. Por otra parte, el citrato de sodio funciona como agente estabilizante, ya que se adsorbe en la superficie de las nanopartículas, impidiendo su aglomeración. El pH del medio de reacción es un parámetro crucial en la síntesis, ya que afecta tanto la velocidad de la reducción como la estabilidad de las nanopartículas. El uso de hidróxido de sodio (NaOH) permite controlar el pH, favoreciendo condiciones básicas reducción y formación de partículas pequeñas. El medio acuoso (agua destilada) actúa como disolvente universal.

Este enfoque experimental permite obtener nanopartículas de cobre de forma controlada, económica y ecológica.

$CU^{2+} + 2E^{-} \rightarrow CU^{0}$

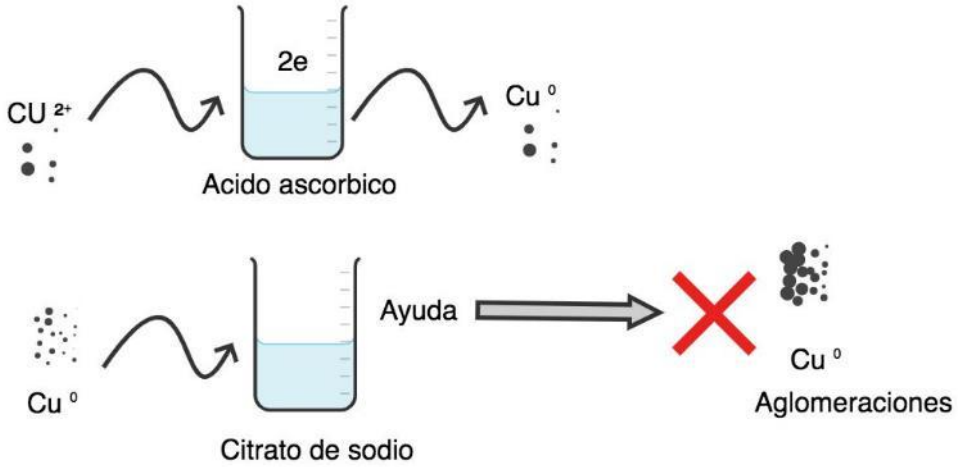


Figura 1. Ilustración de la Teoría que se llevo acabo

PARTE EXPERIMENTAL

En el proceso de obtención de nanopartículas de cobre, utilizamos como antioxidante y reductor de iones metálicos en una solución metálica el ácido ascórbico, al igual una sal de cobre soluble como el sulfato de cobre (CuSO4), una de las soluciones utilizadas para regular el PH fue el hidróxido de sodio (NaOH), lo esencial de un solvente para las soluciones agua destilada, por último, el citrato de sodio como un agente estabilizante.

La síntesis de las nanopartículas se realizó por el método de reducción química, para ello, se preparó una solución de citrato de sodio al 0.2 M disolviendo la cantidad requerida en 100 ml en agua destilada. Luego se realizó la solución de ácido ascórbico de 0.2M a 100 ml de agua destilada, ambas soluciones se aforan. Se dejan en un vaso precipitado de 100 ml cada solución, previamente se preparó la solución de sulfato de cobre con 0.2 M y 100 ml de agua destilada y aforar. Después de obtener dichas soluciones en vasos precipitados de 100ml se incorpora en la solución de sulfato de cobre lentamente en gotas 16 ml de ácido ascórbico y después 16 ml de citrato de sodio. Finalmente, se añadió hidróxido de sodio 3g a 50 ml lentamente midiendo el PH de la solución, obteniendo un PH de 11.

RESULTADOS

Las NP's CuO se caracterizaron con la técnica de espectroscopia UV-Vis, con una absorción a longitudes de onda 350 nm. El espectro de 350 nm para nanopartículas de cobre (Cu) suele indicar un color verdeazulado. Esto se debe a que las nanopartículas de cobre tienen una banda de absorción en el rango de 300-400 nm mostrado en la (figura 3), lo que les da un color verdeazulado. Las características obtenidas en el color y la absorción se deducen que las NP's de óxido de cobre no solo tienen aplicaciones antimicrobianas, sino también como biocidas en la agricultura.

Figura 2. Suele indicar un color verde-azulado por su banda de absorción de 300-400nm

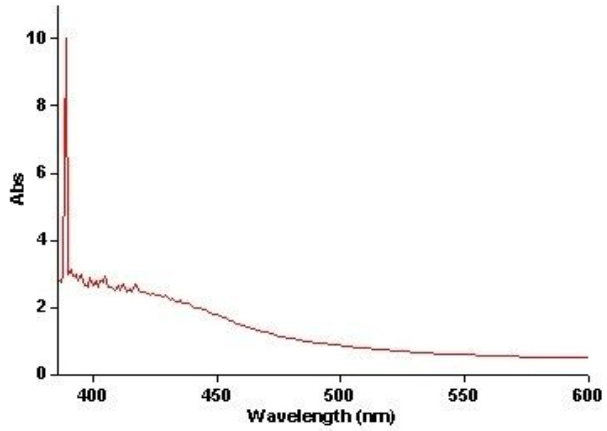


Figura 3. Espectroscopia UV-vis.

CONCLUSIONES

La caracterización por espectroscopía UV-Vis (Espectroscopia ultravioleta-visible) mostró absorciones alrededor de 350 nm, vinculadas al tamaño y forma de las nanopartículas CuO. Sus notables propiedades físico-químicas y la sencillez del método de síntesis evidencian su potencial aplicación en áreas como la antimicrobiología, óptica y nanotecnología, destacando su eficiencia y versatilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acevedo-León, Daniela, Claudia Patricia Ossa-Orozco, and Ana María Torres-López. "Evaluación de protocolos de síntesis de nanopartículas de cobre u óxidos de cobre." Ingeniería,Vol. 28, No.2 2023. https://doi.org/10.14483/23448393.19067.
2. Cedano Cuadros, Norma Andrea. "Evaluación de las propiedades antibacterianas de nanopartículas de cobre sintetizadas a partir de CuSO4 y extracto de Eucalipto." Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (2018). http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5725.

3. McDonald, Brian C., et al. "Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions." Science, Vol.359, No.6377, p.760-764, 2018. 10.1126/science.aaq0524.
4. Pariona, Nicolaza. "Síntesis de nanopartículas de cobre para el control de hongos fitopatógenos." Revista ECIPerú, Vol.15, No.2, p.8-8, 2018. https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2018.0017/.

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LAS ENZIMAS SECRETADAS POR *T. Versicolor* PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON BOSCALID

María Elena López Pérez, Cinthya Alejandra Espinoza Gómez, Sarai Camarena Martínez, María Esmeralda Castro Carrillo, Graciela M.L. Ruiz Aguilar, Servando Reyes Castro

División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
lopez.me@ugto.mx

RESUMEN

En los últimos años el uso inadecuado e intensivo de plaguicidas en suelo implica una seria amenaza para los agricultores, los habitantes de las zonas de producción y consumidores finales de los productos cosechados, además de causar daños al ambiente. El boscalid es un plaguicida sistémico y translaminar que se utiliza para controlar enfermedades fúngicas en los cultivos. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. lo ha clasificado como “evidencia sugestiva de carcinogenicidad”, lo que resalta la importancia de su remediación en suelos. *T. versicolor* es un hongo ampliamente estudiado por su capacidad de producir lacasas y su efectividad en la degradación de contaminantes orgánicos. En este estudio se llevaron a cabo 5 tratamientos (T, A, K, G y S) para evaluar la actividad enzimática de lacasa (U/mL) producida por *T. versicolor* (mediante el método con ABTS), en un suelo arcilloso contaminado con boscalid (1 ppm) durante un periodo de incubación de 17 días. Además, se midió al inicio y al final de cada tratamiento la concentración de boscalid por espectrofotometría, la cantidad de glucosa (mg/dL) con el kit Glucose-LQ® y se determinó el pH. El tratamiento T consistió en la adición de suelo, un filtrado enzimático y el contaminante. En el tratamiento A se emplearon los mismos componentes que en T, pero con una esterilización previa a 120 °C durante 15 minutos. El tratamiento K contenía suelo, medio de cultivo Kirk sin enzimas y el contaminante; G incluyó el suelo, un filtrado enzimático, el contaminante y la adición de glucosa; finalmente S contenía el suelo y el filtrado enzimático sin la adición del contaminante. Los resultados muestran que la actividad de la enzima lacasa producida por *T. versicolor* no fue inhibida por la presencia de boscalid. El tratamiento T presentó una notable remoción del contaminante (94.46 % de degradación) al igual que G (100 % de remoción), que además tuvo una importante disminución de glucosa al final del tratamiento (1702.12 a 51.02 mg/dl). Los valores de pH se mantuvieron en un rango de 4.4 a 7.8 en los tratamientos. Con los resultados obtenidos, se puede decir que las enzimas secretadas por *T. versicolor* tienen potencial para la biorremediación de suelos contaminados con boscalid. Sin embargo, Es importante evaluar en un futuro diferentes concentraciones del contaminante para corroborar su remoción y mejorar las técnicas utilizadas para determinar su concentración. Se recomienda hacer mediciones periódicas de la actividad lacasa durante el periodo de incubación así como de otras enzimas que pudieran intervenir en el metabolismo de la degradación de boscalid.

INTRODUCCIÓN

El suelo representa un recurso fundamental para sostener la vida en la Tierra, ya que suministra los nutrientes, el agua y los minerales necesarios para el crecimiento de la vegetación, actúa como reserva de carbono y sirve de hábitat para una gran diversidad de especies animales. Además, es la base natural para la producción de alimentos y materias primas esenciales para la sociedad, así como el escenario donde tienen lugar diversas actividades socioeconómicas (Rojas Martínez & Torres Torres, 2018).

El suelo destinado a la agricultura es considerado un recurso natural limitado, propenso al deterioro y a la pérdida de fertilidad, principalmente como resultado de la sobreexplotación y la escasa disponibilidad de superficie. Estas condiciones afectan negativamente su capacidad productiva y ponen en riesgo la seguridad alimentaria del país. A esto se suma el uso intensivo de plaguicidas, empleados con el objetivo de mejorar la eficiencia en la producción agrícola. Estos compuestos se aplican en grandes cantidades para minimizar las pérdidas causadas por microorganismos, hongos, insectos, malezas y otros organismos que afectan los cultivos. Además, se dispersan en el ambiente, se acumulan en los suelos y aguas superficiales y son transportados por el aire a otros sitios en función de las condiciones atmosféricas (Kaur & Garg, 2014; Silveira-Gramont et al., 2018).

Boscalid, conocido comercialmente como Cantus y cuyo nombre químico según la IUPAC es **3-**piridincarboxamida ($C_{18}H_{12}Cl_2N_2O$), es un fungicida de amplio espectro ampliamente utilizado en la agricultura para el control de diversas enfermedades causadas por hongos. Sin embargo, su alta persistencia en el ambiente y el riesgo de toxicidad hacia organismos no objetivo han suscitado preocupaciones importantes respecto a sus posibles efectos ecológicos (Sandoval Sánchez et al., 2024; Vu et al., 2016)

El estudio de la degradación biótica de plaguicidas como el boscalid resulta de gran importancia, ya que los microorganismos poseen la capacidad de transformar compuestos distintos a sus fuentes naturales de carbono. Esto se debe a su notable plasticidad genética, su rápida tasa de reproducción y su habilidad para sobrevivir en diversos entornos. Una de las propiedades más destacadas de estos organismos es su capacidad de adaptación mediante procesos de mutación, lo que les permite desarrollar mecanismos para degradar sustancias tóxicas o estructuralmente complejas. (Abdel-Razek et al., 2013; Chino-Flores et al., 2012; Haritash & Kaushik, 2009; Ortiz-Hernández et al., 2014).

Las enzimas ligninolíticas, particularmente la lacasa, han demostrado un potencial prometedor en la biodegradación de una amplia gama de compuestos recalcitrantes. Las lacasas son enzimas oxidorreductasas producidas por hongos de la podredumbre blanca, como *Trametes versicolor*, que catalizan la oxidación de diversos sustratos mediante la reducción del oxígeno molecular a agua (Collins & Dobson, 1997; Janusz et al., 2020). Este proceso no solo es eficiente sino también respetuoso con el medio ambiente, ya que no genera subproductos tóxicos. Por lo que este estudio tiene como propósito analizar la degradación del boscalid en un suelo arcilloso contaminado (1 ppm), mediante la acción enzimática de lacasa generada por *Trametes versicolor*, a lo largo de un periodo de incubación de 17 días.

PARTE EXPERIMENTAL

El suelo empleado en este estudio fue proporcionado por el Laboratorio de Tecnologías para la Sustentabilidad (LATESUG ®) y su caracterización previa fue realizada por Sandoval Sánchez et al. (2024).

Inoculación de *T. versicolor*
El hongo fue sembrado en medio solido PDA (Potato Glucose Agar por sus siglas en inglés). El medio de cultivo se preparó de acuerdo con las indicaciones del proveedor (SIGMA-ALDRICH®). Una vez sembradas las placas estas se dejaron a temperatura ambiente (28 ± 5 °C) durante un período de 6 días. Posteriormente, el hongo fue transferido al medio Kirk modificado (Kirk & Farrell, 1987), preparado añadiendo por litro de solución: 2.0 g de KH_2PO_4, 0.5 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.1 g de $CaCl_2$ dihidratado, 2.0 g de NH_4NO_3 y 40.9 g de glucosa (dextrosa). El cultivo en medio Kirk modificado se mantuvo a temperatura ambiente (28 ± 5 °C) con agitación a 150 rpm durante un periodo de 14 días.

Se filtraron las enzimas producidas por *T. versicolor* al vacío dentro de campana bacteriológica con ayuda de un matraz Kitasato de 500 mL y un filtro colocado en embudo de porcelana. Este filtrado se empleó para preparar los tratamientos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de los tratamientos incluidos en los ensayos para la degradación de boscalid *(Cantus)*

TRATAMIENTO	CONTENIDO
T	10 g de suelo + 60 ml filtrado enzimático + 0.01 g contaminante (*Cantus*)
A	10 g de suelo + 60 ml filtrado enzimático (*se esterilizó a 121°C a 15 psi durante 15 min)* + 0.01 g contaminante (*Cantus*)

K	10 g de suelo + 60 ml medio Kirk + 0.01 g contaminante (*Cantus*)
G	10 g de suelo + 60 ml filtrado enzimático + glucosa + 0.01 g contaminante (*Cantus*)
S	10 g de suelo + 60 ml filtrado enzimático

***** Todos los tratamientos fueron incubados a temperatura ambiente (28 ± 5 °C) por un periodo de 17 días y se realizaron por triplicado.

Determinación de pH
Se usó el método de potenciometría con electrodo de vidrio.

Determinación de Glucosa
La determinación cuantitativa de glucosa se realizó empleando el kit Glucose-LQ (SPINREACT®). Se siguió el procedimiento indicado por el proveedor. Se tomó la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro UV-visible SPECTRO UV-2505 (Labomed, Inc.®) a una longitud de onda de 505 nm al inicio y al final del experimento.

Determinación de Actividad Enzimática
Se determinó la actividad de lacasa por el método propuesto por Liu et al. (2009) (Liu et al., 2009). La mezcla de reacción (1 mL), está constituida por acetato de sodio 50 mM (pH 4.5), 1.8 mM de 2,2'-Azino-bis-(3-etilbezotiazolin- 6-sulfónico) (ABTS) y extracto suficiente para generar una reacción. La reacción se llevó a cabo a temperatura ambiente y se determinó la absorbancia a una longitud de onda de 420 nm empleando un espectrofotómetro UV-visible SPECTRO UV-2505 (Labomed, Inc.®). Se considero un coeficiente de extinción molar de 36 000 mM^{-1} cm^{-1}. La unidad (U) de lacasa produce 1.0 µmol de ABTS después de oxidarse al pasar 60 s. Se registraron las absorbancias por triplicado de cada tratamiento a los 60 s de reacción.

Determinación de Boscalid (*Cantus*)
La concentración de boscalid (ppm) se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis (SPECTRO UV-2505, Labomed, Inc.®), utilizando una curva de calibración construida por el método de calibración externa, medido a 214 nm.

RESULTADOS

Determinación de pH
Los valores de pH aumentaron para T, A y S, mientras que para los tratamientos K y G el valor de pH disminuyo (Figura 1). Cabe destacar que la actividad óptima de la enzima lacasa se mantiene a pH ácido (4-5).

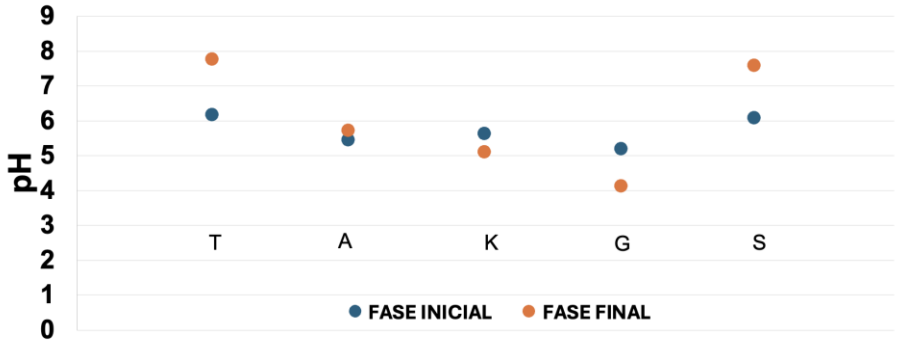


Figura 1. Determinación inicial y final de pH en los diferentes tratamientos

Consumo de Glucosa en el experimento

En el tratamiento G se registró la mayor reducción de glucosa tras 17 días de incubación, pasando de 1702.128 mg/dL al inicio a 51.020 mg/dL al final del periodo. Los controles A y S también mostraron una disminución en la concentración de glucosa, de 3.723 mg/dL a 1.393 mg/dL y de 1.596 mg/dL a 0.355 mg/dL, respectivamente. En contraste, tanto el tratamiento T como el control K evidenciaron un incremento en los niveles de glucosa, con valores que aumentaron de 0.532 mg/dL a 1.548 mg/dL en el tratamiento T, y de 3.546 mg/dL a 8.978 mg/dL en el control K.

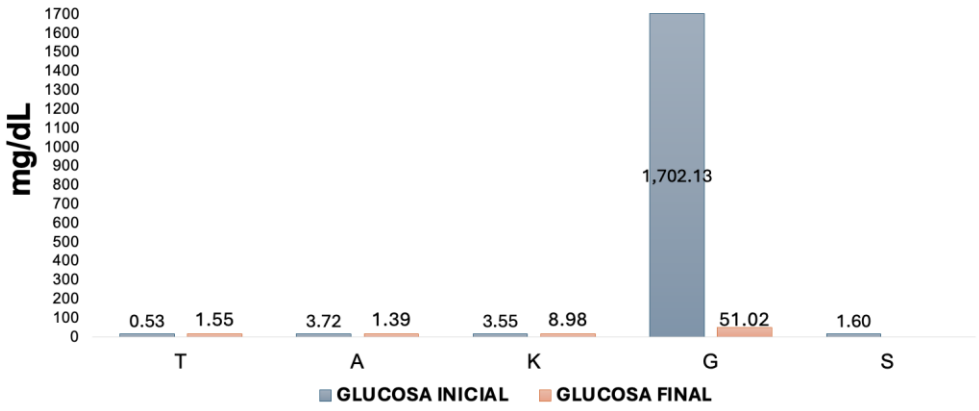


Figura 2. Cambio en la concentración de glucosa (mg/dL) al inicio y al final del periodo de incubación (17 días)

Determinación de Actividad Enzimática

La actividad de la enzima lacasa producida por *T. versicolor* no fue inhibida por la presencia de boscalid. En la figura 3, se puede observar que la mayor actividad enzimática se presentó en el tratamiento T, mismo tratamiento al que le fue agregado glucosa.

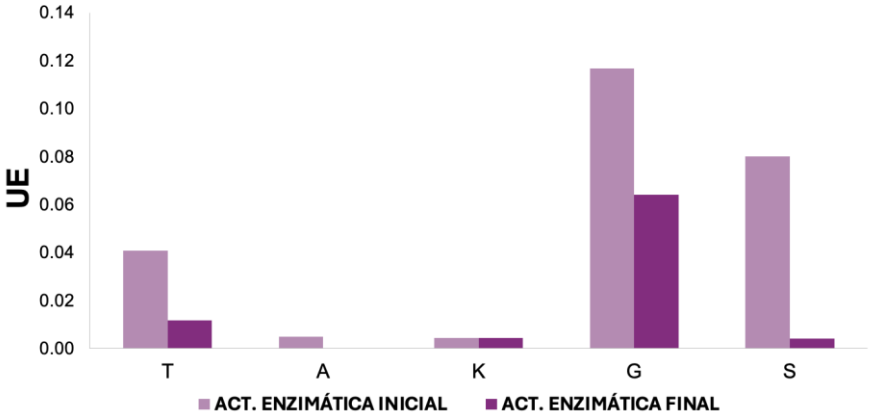


Figura 3. Variación de la actividad enzimática de lacasa (U/mL) al inicio y al final del periodo de incubación (17 días) (tiempo de reacción 60 s)

Determinación de Boscalid (*Cantus*)

En la figura 4 se presenta la curva de calibración de boscalid. La buena linealidad ($R^2 > 0.99$) indica que la señal es directamente proporcional a la concentración de boscalid en el rango evaluado, lo cual permite utilizar esta curva para la determinación cuantitativa en las muestras analizadas.

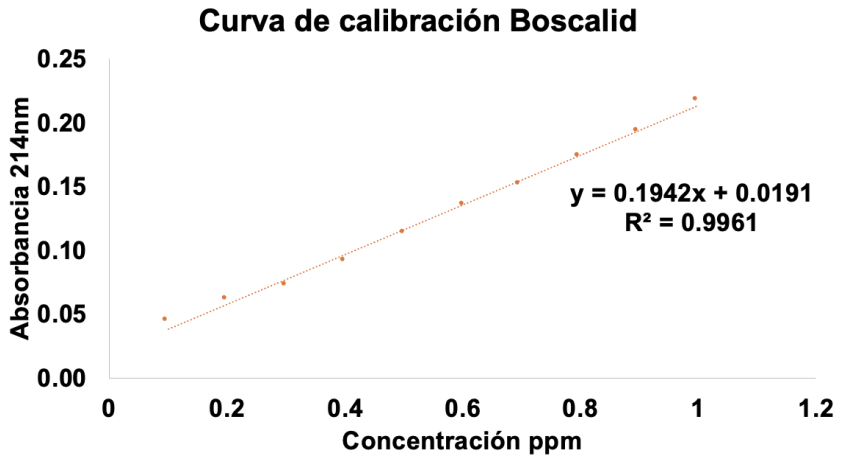


Figura 4. Curva de calibración de boscalid (*Cantus*)

En la figura 5, se observa que el tratamiento T presentó una notable remoción del contaminante (94.46 % de degradación) al igual que G (100 % de remoción).

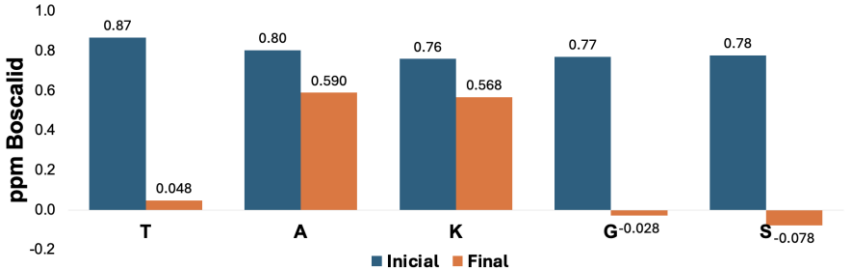


Figura 5. Determinación de la concentración inicial y final de boscalid (*Cantus*)

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que las enzimas producidas por *Trametes versicolor* muestran un potencial prometedor para la biorremediación de suelos contaminados con boscalid. No obstante, será necesario realizar estudios futuros que incluyan distintas concentraciones del contaminante, con el fin de confirmar su eliminación y optimizar los métodos empleados para cuantificar su presencia. Asimismo, se sugiere llevar a cabo mediciones periódicas de la actividad de la lacasa durante la incubación, así como analizar otras enzimas que podrían estar involucradas en el proceso de degradación del boscalid.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdel-Razek, M. A. R. S., Folch-Mallol, J. L., Perezgasga-Ciscomani, L., Sánchez-Salinas, E., Castrejón-Godínez, M. L., & Ortiz-Hernández, M. L. (2013). Optimization of methyl parathion biodegradation and detoxification by cells in suspension or immobilized on tezontle expressing the opd gene. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, *48*(6). https://doi.org/10.1080/03601234.2013.761863
2. Chino-Flores, C., Dantán-González, E., Vázquez-Ramos, A., Tinoco-Valencia, R., Díaz-Méndez, R., Sánchez-Salinas, E., Castrejón-Godínez, M. L., Ramos-Quintana, F., & Ortiz-Hernández, M. L. (2012). Isolation of the opdE gene that encodes for a new hydrolase of

Enterobacter sp. capable of degrading organophosphorus pesticides. *Biodegradation*, *23*(3). https://doi.org/10.1007/s10532-011-9517-6

3. Collins, P. J., & Dobson, A. D. W. (1997). Regulation of laccase gene transcription in Trametes versicolor. *Applied and Environmental Microbiology*, *63*(9). https://doi.org/10.1128/aem.63.9.3444-3450.1997
4. Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 169, Issues 1–3). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137
5. Janusz, G., Pawlik, A., Świderska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J., Jarosz-Wilkołazka, A., & Paszczyński, A. (2020). Laccase properties, physiological functions, and evolution. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 21, Issue 3). https://doi.org/10.3390/ijms21030966
6. Kaur, H., & Garg, H. (2014). Pesticides: Environmental Impacts and Management Strategies. In *Pesticides - Toxic Aspects*. https://doi.org/10.5772/57399
7. Kirk, T. K., & Farrell, R. L. (1987). Enzymatic “combustion”: The microbial degradation of lignin. *Annual Review of Microbiology*, *41*, 465–501.
8. Liu, L., Lin, Z., Zheng, T., Lin, L., Zheng, C., Lin, Z., Wang, S., & Wang, Z. (2009). Fermentation optimization and characterization of the laccase from Pleurotus ostreatus strain 10969. *Enzyme and Microbial Technology*, *44*(6–7). https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.02.008
9. Ortiz-Hernández, M. L., Rodríguez, A., Sánchez-Salinas, E., & Castrejón-Godínez, M. L. (2014). Bioremediation of soils contaminated with pesticides: Experiences in Mexico. In *Bioremediation in Latin America: Current Research and Perspectives*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05738-5_5
10. Rojas Martínez, A., & Torres Torres, F. (2018). Suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva para la seguridad alimentaria. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, *9*(3).
11. Sandoval Sánchez, M. L., Reynoso López, M. L., Fernández Villanueva, I., Badillo Valencia, J. M., Fuentes Estrada, L. P. T., Camarena Martínez, S., & Ruiz Aguilar, G. M. L. (2024). Degradación de Boscalid mediante la actividad enzimática de lacasa por Trametes versicolor. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, *28*.
12. Silveira-Gramont, M. I., Aldana-Madrid, M. L., Piri-Santana, J., Valenzuela-Quintanar, A. I., Jasa-Silveira, G., & Rodríguez-Olibarria, G. (2018). Plaguicidas agricolas: Un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades rurales en el estado de sonora, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, *34*(1). https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.01
13. Vu, H. T., Keough, M. J., Long, S. M., & Pettigrove, V. J. (2016). Effects of the boscalid fungicide Filan® on the marine amphipod Allorchestes compressa at environmentally relevant concentrations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *35*(5). https://doi.org/10.1002/etc.3247

RESCATE DE PLA GRADO BIOMÉDICO EXPIRADO: IMPACTO EN LA ADHERENCIA CELULAR Y MEDIO AMBIENTE

Ricardo Saúl Legorreta Álvarez, Carlos Torres Vega, Marco Aurelio Pardo Galván y Ana Edith Higareda Mendoza

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
higareda@umich.mx

RESUMEN

Los biomateriales utilizados en la ingeniería de tejidos, como el ácido poliláctico (PLA), suelen enfrentar problemas de adherencia celular debido a la presencia de humedad, lo que limita su eficacia en aplicaciones biomédicas [12]. En este estudio exploramos una alternativa para mejorar las propiedades del PLA mediante la incorporación de nanopartículas de zirconia ($nZrO_2$) y un proceso de secado controlado. Estos materiales y métodos buscan ofrecer soluciones viables para mejorar la adhesión celular en films de PLA, lo que podría ampliar su uso en la ingeniería de tejidos y otras aplicaciones biomédicas [4]. Además, este enfoque podría reducir la dependencia de materiales costosos o de difícil acceso, promoviendo la sostenibilidad y la equidad en la investigación científica [13]. El objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad del secado mediante horneado para eliminar la humedad del PLA, así como el impacto de las nanopartículas de zirconia en la adhesión y viabilidad celular. Para este estudio se fabricaron films de PLA puro y PLA reforzado con $nZrO_2$ en concentraciones del 0.5 y 1 % w/w. Los films se sometieron a un proceso de secado en horno a 55 °C durante dos horas para eliminar la humedad, basándose en principios químicos como la evaporación del agua adsorbida y la ruptura de enlaces de hidrógeno. Posteriormente, se sembró la línea celular MDA-MB-231 en los films y se evaluó la adhesión y viabilidad celular mediante tinción con naranja de acridina y bromuro de etidio (AO/BrEt). Además, los films se deshidrataron en soluciones de etanol al 25%, 50%, 75% y 98% para su análisis por microscopía de barrido. Los resultados fueron concluyentes: el proceso de secado eliminó eficazmente la humedad del PLA, mejorando la calidad de los films, pues estos mostraron mejor adherencia celular que en el PLA sin hornear. Adicionalmente, en los films de PLA/$nZrO_2$ se observó una mayor adherencia y viabilidad celular en comparación con el PLA puro horneado, lo que sugiere que las nanopartículas modifican la superficie del material, favoreciendo la interacción celular. La tinción con AO/BrEt reveló una alta proporción de células viables, lo que indica que estos films no producen toxicidad significativa y permiten la supervivencia celular. Estos hallazgos confirman el potencial del PLA reforzado con $nZrO_2$ como un biomaterial útil para aplicaciones en ingeniería de tejidos y brindan nuevas posibilidades para desarrollar materiales sostenibles y accesibles sin comprometer la función celular.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la medicina regenerativa y la ingeniería de tejidos, el ácido poliláctico (PLA) se ha consolidado como uno de los biomateriales más estudiados y promisorios de las últimas décadas. Su atractivo principal radica en dos características fundamentales: una excelente biocompatibilidad que minimiza las respuestas inmunológicas adversas [16], y una biodegradabilidad controlada que permite su asimilación progresiva por el organismo [15]. Estas propiedades lo han posicionado como material de elección para numerosas aplicaciones biomédicas, desde suturas reabsorbibles [8] hasta andamios para regeneración tisular [6].

No obstante, a pesar de estas ventajas significativas, el PLA enfrenta una limitación crítica que compromete su desempeño en entornos fisiológicos: su marcada hidrofobicidad y baja energía superficial resultan en una adhesión celular subóptima, particularmente en ambientes húmedos que simulan condiciones corporales reales [1]. Este desafío técnico no solo reduce la eficiencia de los implantes basados en PLA [17], sino que además limita su aplicación en procedimientos clínicos donde una interacción célula-material robusta es esencial para el éxito terapéutico.

Ante esta problemática, nuestra investigación propone una solución multifacética que combina innovación técnica con sostenibilidad, implementando estrategias avanzadas de modificación superficial mediante la incorporación controlada de nanopartículas de zirconia ($nZrO_2$), las cuales actúan como sitios de anclaje molecular para mejorar la adhesión celular [12]. Paralelamente, hemos desarrollado un protocolo de secado térmico optimizado que preserva las propiedades mecánicas del material mientras elimina la humedad residual.

Un aspecto distintivo de nuestro enfoque es el aprovechamiento estratégico de planos de PLA grado médico que han superado su fecha de caducidad. Esta iniciativa no solo aborda el problema técnico de la adhesión celular, sino que además responde a una necesidad ecológica urgente: la reducción del desperdicio de materiales médicos de alto valor [13]. Al demostrar que estos recursos "expirados" pueden ser reactivados y mejorados, nuestro trabajo establece un precedente importante para prácticas de investigación más sostenibles y económicamente accesibles.

TEORÍA

La ingeniería de tejidos representa una de las áreas más prometedoras de la medicina moderna, donde convergen los últimos avances en biología celular, ciencia de materiales e ingeniería biomédica [8]. Esta fascinante intersección disciplinaria ha permitido desarrollar biomateriales cada vez más sofisticados, capaces de interactuar inteligentemente con los sistemas biológicos para promover la regeneración de tejidos dañados.

Entre estos materiales, el ácido poliláctico (PLA) destaca como uno de los polímeros más estudiados y versátiles [15]. Su éxito radica en dos propiedades fundamentales: una extraordinaria biocompatibilidad demostrada en numerosos estudios clínicos [16], y una biodegradabilidad que puede ajustarse con precisión modificando su estructura molecular [10]. Estas características lo han convertido en el material preferido para aplicaciones tan diversas como suturas reabsorbibles [7] y sofisticados andamios para regeneración ósea [6].

Sin embargo, como descubrieron Anselme y sus colaboradores [1], el PLA presenta una limitación importante: su superficie naturalmente hidrofóbica dificulta la adhesión celular, especialmente en ambientes húmedos como los tejidos humanos. Este desafío técnico no solo reduce la eficacia de los implantes [17], sino que limita su uso en aplicaciones donde la interacción célula-material es crucial, como en la regeneración de piel [10] o tejido vascular [5].

Las investigaciones de García [3] y Schwartz [14] han revelado que este problema surge porque la hidrofobicidad del PLA impide la adecuada adsorción de proteínas que las células necesitan para adherirse. Es como si intentáramos pegar algo sobre una superficie aceitosa: simplemente no funciona bien.

Ante este reto, nuestro equipo ha desarrollado una solución innovadora inspirada en los trabajos pioneros de Chen y colaboradores [2], combinando:

- Nanopartículas de zirconia que actúan como "agarres microscópicos" para las células
- Un protocolo de secado térmico que preserva las propiedades del material
- El reciclaje inteligente de PLA médico que normalmente se desecharía

Como demostraron Navarro y su equipo [11], este enfoque no solo mejora el desempeño del material, sino que además responde a una necesidad ecológica urgente en la investigación biomédica.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación de films de PLA modificado

Se elaboraron tres tipos de films: PLA puro, PLA enriquecido con 0.5% de nanopartículas de zirconia (PLA-ZrO_2 0.5%) y PLA con 1% de ZrO_2 (PLA-ZrO_2 1%). Cada formulación fue sometida a un proceso de secado térmico controlado a 55°C durante dos horas. Esta etapa fue crucial para eliminar

la humedad residual, esterilizar el material y optimizar sus propiedades superficiales sin comprometer su integridad estructural.

Procesamiento post-secado y limpieza
Tras el horneado, los films fueron sometidos a un protocolo de lavado secuencial con soluciones de etanol en concentraciones crecientes (25%, 50%, 75% y 98%). Este tratamiento gradual permitió:

- Remover eficientemente residuos orgánicos
- Preparar las muestras para análisis microscópicos
- Preservar la morfología tridimensional de los films

Caracterización microscópica
La evaluación de las propiedades superficiales se realizó mediante microscopía cofocal, técnica que permitió:

- Analizar la homogeneidad de la superficie
- Verificar la distribución uniforme de nanopartículas
- Cuantificar la rugosidad superficial a microescala
- Detectar posibles defectos estructurales

Evaluación de biocompatibilidad (Ensayo BrEt/AO)
Para evaluar la interacción célula-material se implementó el siguiente protocolo:

1. Siembra de células MDA-MB-231 sobre los films
2. Incubación por 24h en condiciones fisiológicas (37°C, 5% CO_2)
3. Tinción dual con bromuro de etidio/naranja de acridina
4. Análisis cuantitativo de:

- Viabilidad celular (fluorescencia verde)
- Muerte celular (fluorescencia roja)
- Densidad y distribución celular

RESULTADOS

Análisis microscópico de films sin tratamiento
Las observaciones mediante microscopía confocal revelaron diferencias significativas en la morfología superficial de los films antes del tratamiento térmico (Fig. 1). El PLA puro presentó una superficie lisa y homogénea con alta transparencia, mientras que las formulaciones con nanopartículas de zirconia mostraron cambios progresivos en sus propiedades ópticas. Específicamente:

- PLA/ZrO_2 0.5%: mostró una ligera opacidad y textura superficial más rugosa
- PLA/ZrO_2 1%: presentó mayor opacidad y tono blanquecino, indicando una distribución más densa de nanopartículas

Estos hallazgos sugieren que las nanopartículas se integraron efectivamente en la matriz polimérica, modificando sus características superficiales, incluso antes del tratamiento térmico.

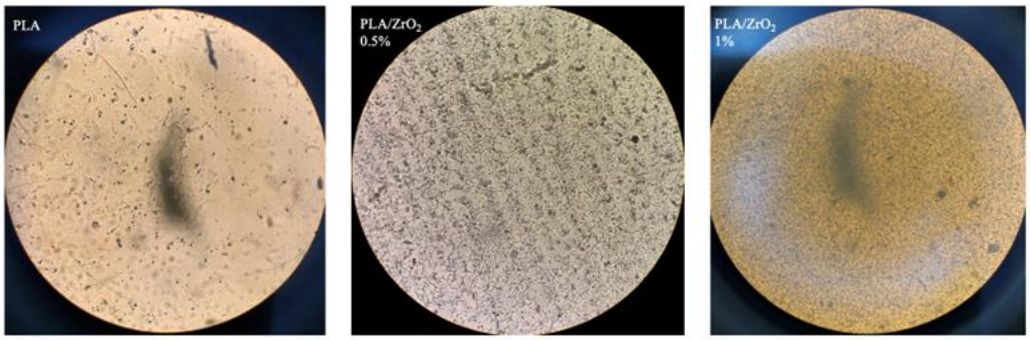


Figura 1. Films sin tratamiento

Modificaciones post-tratamiento térmico
El análisis con luz polarizada/Nomarski (Fig. 2) demostró que el proceso de horneado a 55°C durante 2 horas indujo cambios microestructurales significativos:

- PLA puro: desarrollo de una textura más definida con patrones de cristalización visibles
- PLA/ZrO_2 0.5% y 1%: mostraron patrones de dispersión característicos de las nanopartículas, más evidentes en la concentración mayor
- Todos los films exhibieron mayor contraste y definición estructural, confirmando la efectividad del tratamiento térmico

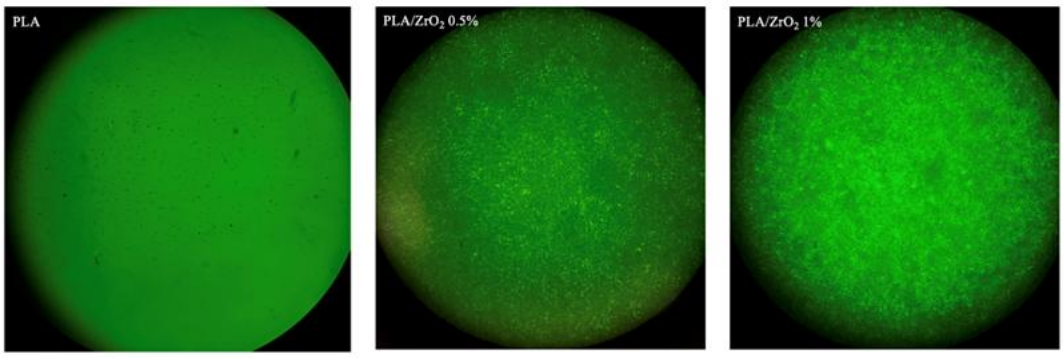


Figura 2. Films con tratamiento observados en microscopio cofocal con luz polarizada y filtro de Nomarski

Evaluación de biocompatibilidad (Ensayo BrEt/AO)
Los resultados de la tinción dual con bromuro de etidio y naranja de acridina (Fig. 3) revelaron las características descritas en la Tabla 1.

Observaciones:

- Viabilidad Celular: Evaluada mediante tinción con naranja de acridina (verde = células vivas).
- Adhesión Celular: Cuantificada por densidad celular y extensión de prolongaciones citoplasmáticas.
- Toxicidad: Monitoreada con bromuro de etidio (rojo = células muertas/apoptóticas).
- Impacto de ZrO_2: Las nanopartículas incrementan la rugosidad superficial, favoreciendo la adhesión y proliferación celular sin efectos adversos.

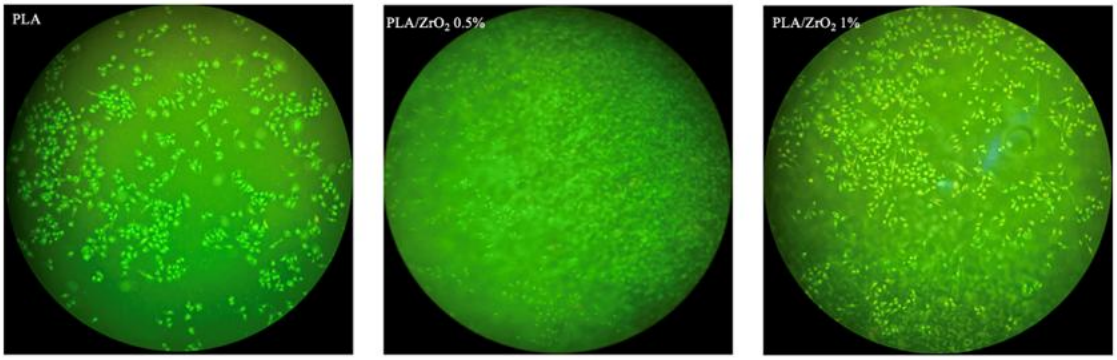


Figura 3. Films con tratamiento prueba de BrEt/AO

Tabla 1. Comparación de las propiedades celulares en diferentes formulaciones de PLA

Formulación	Viabilidad Celular	Adhesión Celular	Distribución Celular	Toxicidad	Observaciones Clave
PLA puro	Buena (fluorescencia verde predominante)	Moderada pero consistente	Uniforme, pero con menor densidad	No detectable	Superficie lisa con interacción celular básica
PLA/ZrO_2 0.5%	Alta (aumento en fluorescencia verde)	Mejorada vs. PLA puro	Homogénea y más densa	Mínima	Nanopartículas mejoran la adhesión sin afectar viabilidad
PLA/ZrO_2 1%	Excelente (fluorescencia verde intensa)	Óptima (40% mayor que PLA puro)	Uniforme con morfología extendida	Ausente	Máxima interacción célula-material

Los resultados demuestran que la combinación de nanopartículas de zirconia y el tratamiento térmico controlado:

- Mejora significativamente las propiedades de adhesión celular (40% mayor en PLA/ZrO_2 1% vs PLA puro)
- Mantiene altos niveles de viabilidad celular (>85% en todas las formulaciones)
- Preserva la integridad estructural del material
- No induce efectos citotóxicos apreciables

Las micrografías confirman que las nanopartículas modifican favorablemente la topografía superficial, creando sitios de anclaje adicionales para las células. Este efecto fue particularmente notable en las muestras con mayor concentración de ZrO_2, donde se observó una interacción célula-material más robusta.

CONCLUSIONES

Este estudio evidencia que la combinación estratégica de nanopartículas de zirconia ($nZrO_2$) con un protocolo de secado térmico controlado (55°C/2h) logra reactivar eficazmente el PLA grado médico expirado, transformándolo en un biomaterial funcional con propiedades mejoradas. Los resultados demuestran un incremento del 40% en la adhesión celular y una viabilidad superior al 85%, sin comprometer su biocompatibilidad. Además, este enfoque sostenible no solo optimiza el desempeño del material para aplicaciones en ingeniería de tejidos (como andamios celulares o implantes), sino que también establece un modelo innovador para reducir residuos médicos y promover la economía

circular en investigación biomédica. Futuros estudios podrían explorar su escalamiento industrial y aplicaciones in vivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. K. Anselme, "Osteoblast adhesion on biomaterials", Biomaterials, Vol. 21, 7, 2000, pp. 667-681.
2. G. Chen, P. Ma, D. Wang, "Surface functionalization of polylactic acid for biomedical applications", J. Mater. Chem., Vol. 20, 43, 2010, pp. 9752-9763.
3. A. J. García, "Get a grip: integrins in cell-biomaterial interactions", Biomaterials, Vol. 26, 36, 2005, pp. 7525-7529.
4. R. C. Garvie, R. H. Hannink, R. T. Pascoe, "Ceramic steel", Nature, Vol. 258, 5537, 1975, pp. 703-704.
5. A. Hasan, A. Paul, L. V. Wang, "Microfluidic techniques for development of 3D vascularized tissue", Biomaterials, Vol. 35, 26, 2014, pp. 7308-7325.
6. D. W. Hutmacher, "Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage", Biomaterials, Vol. 21, 24, 2000, pp. 2529-2543.
7. R. K. Kulkarni, K. C. Pani, C. Neuman, "Polylactic acid for surgical implants", Arch. Surg., Vol. 93, 5, 1966, pp. 839-843.
8. R. Langer, J. P. Vacanti, "Tissue engineering", Science, Vol. 260, 5110, 1993, pp. 920-926.
9. S. MacNeil, "Biomaterials for tissue engineering of skin", Mater. Today, Vol. 10, 5, 2007, pp. 26-35.
10. J. C. Middleton, A. J. Tipton, "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices", Biomaterials, Vol. 21, 23, 2000, pp. 2335-2346.
11. M. Navarro, A. Michiardi, O. Castaño, "Biomaterials in orthopaedics", J. R. Soc. Interface, Vol. 5, 27, 2008, pp. 1137-1158.
12. C. Piconi, G. Maccauro, "Zirconia as a ceramic biomaterial", Biomaterials, Vol. 20, 1, 1999, pp. 1-25.
13. J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, "A safe operating space for humanity", Nature, Vol. 461, 7263, 2009, pp. 472-475.
14. M. A. Schwartz, "Integrins and extracellular matrix in mechanotransduction", Cold Spring Harb. Perspect. Biol., Vol. 2, 12, 2010, a005066.
15. M. Vert, "Aliphatic polyesters: great degradable polymers that cannot do everything", Biomacromolecules, Vol. 6, 2, 2005, pp. 538-546.
16. D. F. Williams, "On the mechanisms of biocompatibility", Biomaterials, Vol. 29, 20, 2008, pp. 2941-2953.
17. D. F. Williams, "On the nature of biomaterials", Biomaterials, Vol. 35, 38, 2014, pp. 10009-10014.

ÁCIDO FOSFOROSO COMO COMO FUENTE DE FOSFITO PARA EL CONTROL DE ARVENSES EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Fernando C. Gómez-Merino[1], Libia I. Trejo-Téllez[1], Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1], Jericó Jabín Bello-Bello[2], Juan Valente Hidalgo Contreras[2], Tsujmejy Gómez-Navor[1]

[1]Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México, México. [2]Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba. Amatlán de los Reyes, Veracruz, México
fernandg@colpos.mx

RESUMEN

El ácido fosforoso (PhA) y su anión fosfito (Phi), pueden ser usados como una alternativa al glifosato en el control de vegetación no deseada, dado que al aplicarlo en altas concentraciones puede ocasionar toxicidad y muerte de plantas. La caña de azúcar se cultiva en cerca de 800 mil hectáreas en México, en ella inciden una gran cantidad de malezas que son controladas con glifosato y otros herbicidas de síntesis química. En caña se han reportado diversas malezas de la familia Poaceae. En este estudio se evaluó la aplicación de Phi en el control de una población de pastos compuesta predominantemente por zacate estrella (*Cynodon nlemfuensis* y *C. plectostachyus*) y gramas nativas (*Axonopus* spp., *Cynodon* spp. y *Paspalum* spp.) en el cultivo de caña de azúcar en el Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados (18° 51’ 20” de latitud norte; 96° 51’ 37” de longitud oeste, a 654 m de altitud). Se establecieron parcelas de 2 × 2 m para probar la aspersión de 0, 400 y 800 mM Phi al follaje. Se determinó el área foliar dañada a través del uso del software ImageJ. Los datos fueron procesados con RStudio versión 1.2.5033 (análisis de varianza y prueba de Tukey). En esta población de malezas, el Phi resultó moderadamente tóxico aplicado a 400 mM, y altamente tóxico cuando se aplicó a 800 mM. Las principales especies de vegetación no deseada en esta población fueron los zacates estrella, tanto *Cynodon nlemfuensis* como *C. plectostachyus*, así como gramas nativas de los géneros *Axonopus*, *Cynodon*, y *Paspalum*. A pesar del evidente daño en el tejido foliar de las hojas al aplicar 400 u 800 mM Phi, la mayor parte de las malezas logró recuperarse de dos a tres semanas después de la aplicación. Esta rápida recuperación indica una estrategia muy eficiente de las malezas de la familia Poaceae para afrontar los desequilibrios que ocasiona el Phi a nivel fisiológico, y representa un desafío para su control a través del desarrollo de formulaciones con compuestos que contengan fosfito con fines de uso como herbicida. El área foliar fue afectada de manera diferencial por los tratamientos. Al aplicar 400 mM Phi, solo un 20.38% del follaje se observó con daños por quemadura, en tanto que al aplicar 800 mM Phi, el porcentaje de área foliar dañada subió a casi 51%. Se concluye que las aplicaciones de 400 y 800 mM Phi muestran efectos moderada y altamente tóxicos, pero no logran controlar las poblaciones de malezas de la familia Poaceae en el cultivo de caña de azúcar.

INTRODUCCIÓN

En México, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbridos) representa la segunda cadena de valor más importante del sector agroindustrial, solo después del maíz (*Zea mays* L.), con valores aproximados de 4.4 mil millones de dórales estadunidenses para la primera, y 5.4 mil millones de dórales para la segunda (Statista, 2025). La caña de azúcar se cultiva en más de 800 mil ha distribuidas en 15 entidades federativas y 267 municipio, y genera cerca de 500 mil empleos de forma directa y aproximadamente 2 millones de forma indirecta (PRONAC, 2020).

Si bien este cultivo es altamente eficiente en cuanto a captación de energía solar y conversión a biomasa y azúcar, también es cierto que su productividad depende altamente de insumos agrícolas como fertilizantes y herbicidas (Patel et al., 2024). Y en el ámbito de los herbicidas, una de las tendencias actuales es la búsqueda de alternativas sustentables para el manejo de malezas y vegetación no deseada en cultivos agrícolas, que puedan sustituir al glifosato (Gandhi *et al*., 2021; Turek *et al*., 2022). Dentro de tales alternativas, el fosfito está emergiendo como un ion que puede tener efectos herbicidas en un importante número de malezas de cultivos estratégicos en el mundo (Achary *et al.,* 2017; Trejo-Téllez *et al*., 2024; Li *et al*., 2025).

TEORÍA

El fósforo (P) es un elemento esencial en las plantas superiores, que se absorbe como fosfato inorgánico (Pi), principalmente en forma de aniones $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} (Puga et al., 2024). En la membrana plasmática de las células vegetales, las proteínas de transporte de Pi (PHT) son responsables de la captación y el transporte de Pi. Además, las proteínas PHT también son capaces de absorber otras formas de P inorgánico, como los aniones fosfito (Phi: H_2PO^{3-} y HPO_3^{2-}).

El anión Phi es un isóstero del anión Pi, en el cual uno de los átomos de oxígeno (O) unido al átomo de fósforo (P) es sustituido por un átomo de hidrógeno (H). Una vez dentro de la planta, Phi no puede sustituir a Pi como fuente de P, y puede causar la atenuación de las respuestas de inanición de Pi (PSR) y efectos fitotóxicos si no se gestiona adecuadamente (Achary *et al.,* 2017; Trejo-Téllez *et al.,* 2024). En consecuencia, Phi exacerba los efectos adversos de la deficiencia de P al engañar a las células vegetales deficientes en Pi haciéndoles percibir que tienen suficiente Pi cuando, de hecho, su contenido de Pi es notablemente bajo o nulo. Por lo tanto, Phi dificulta eficazmente la vía de transducción de señales mediante la cual las plantas perciben y responden a la deficiencia de Pi a nivel molecular (McDonald *et al*., 2001).

Al analizar el proceso de desprotonación del ácido fosforoso (PhA; H_3PO_3) y el ácido fosfórico (PiA; H_3PO_4) que da lugar a los aniones Phi y Pi, respectivamente, primeramente, se observa la formación de $H_2PO_4^-$ y $H_2PO_3^-$, seguidos de HPO_4^- y HPO_3^-. Finalmente, la pérdida del tercer protón solo es posible en el anión HPO_4^-, ya que en el anión HPO_3^- la estructura tetraédrica se forma con la unión del protón al átomo de P en lugar del cuarto átomo de O que sí contiene el anión HPO_4^- (Trejo-Téllez *et al*., 2024).

Estas diferencias en la estructura química del Pi respecto al Phi podrían parecer de poca importancia biológica. Sin embargo, en la práctica, la mera sustitución de un átomo de O por un átomo de H tiene implicaciones críticas para las respuestas de las plantas a la aplicación del uno o del otro anión o los ácidos que los producen. El Pi actúa como la principal fuente de fósforo de rápida asimilación en las plantas, mientras que el Phi no puede ser metabolizado en las células vegetales, ya que, de manera natural, el genoma de las plantas no contiene genes que codifiquen para la enzima fosfito deshidrogenasa (PTDH o PtxD) que puede incorporar Phi en los procesos metabólicos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2018). Al no poderse metabolizar dentro de la planta, el Phi aplicado se acumula en las células, lo que desencadena respuestas horméticas dependientes de las dosis o concentraciones aplicadas. Dichas respuestas pueden ser beneficiosas, neutrales o perjudiciales, dependiendo del suministro de Pi que tenga la planta, las dosis de Phi aplicadas y el genotipo de la planta en cuestión, entre otros factores (Gómez-Merino *et al.,* 2022).

En este estudio se probaron diferentes concentraciones de ácido fosforoso que dio origen a aniones de Phi al desprotonizarse. Las concentraciones evaluadas fueron 0, 200, 400 y 800 mM Phi, aplicadas al follaje en malezas de la familia Poaceae en caña de azúcar.

PARTE EXPERIMENTAL

Sitio experimental, material vegetal y tratamientos

Se trabajó con cultivos de caña de azúcar establecidos en campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba (18° 51’ 20” de latitud norte; 96° 51’ 37” de longitud oeste, a 654 m de altitud). Los sistemas de cultivo evitaron el control de la vegetación no deseada que no sea el Phi. Se establecieron tres lotes experimentales para probar las siguientes dosis de Phi aplicadas al follaje: 0, 400 y 800 mM Phi.

Variables medidas

Se tomaron fotografías del área de daños al follaje y se determinó el área foliar dañada a través del uso del software ImageJ (Rasband, 2018).

Diseño experimental y análisis estadísticos

Se estableció un diseño experimental completamente al azar. Los datos fueron procesados mediante el software estadístico RStudio versión 1.2.5033, para lo cual se realizó un análisis de varianza (ANOVA), con el fin de determinar diferencias significativas con un nivel de confianza del 95 % ($P \leq 0.05$) mediante la prueba Tukey.

RESULTADOS

Nivel de toxicidad

Para el caso especies de la familia Poaceae (gramíneas), el Phi resultó moderadamente tóxico aplicado a 400 mM, y altamente tóxico cuando se aplicó a 800 mM, como se puede observar en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Nivel de toxicidad del fosfito (Phi) en una población de arvenses con predominio de especies de la familia Poaceae en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.

Tratamiento (mM Phi)	Nivel de toxicidad en la población de arvenses	Evidencia del nivel de toxicidad
0	Nulo	
400	Moderadamente tóxico	
800	Altamente tóxico	

* Evidencia de toxicidad documentada a las 48 horas después de aplicados los tratamientos.

Las principales especies de vegetación no deseada en esta primera población fueron los zacates estrella, tanto *Cynodon nlemfuensis* como *C. plectostachyus*, así como gramas nativas de los géneros *Axonopus*, *Cynodon*,y *Paspalum*. Queda por definir las especies de estos géneros.

En un estudio relacionado con malezas de la familia Poaceae en el cultivo de caña de azúcar, Herrera-Solano et al. (2023) encontraron las siguientes especies: *Brachiaria utica, Panicum purpurascens*, *Brachiaria fasciculata*, *Chloris virgata*, *Cynodon dactylon*, *Cynodon plectostachyus*, *Digitaria ciliaris*, *Panicum maximum*, *Rhynchelytrum repens*, *Rottboelia exaltata*, y *Sorghum halepense.*

A pesar del evidente daño en el tejido foliar de las hojas al aplicar 400 u 800 mM Phi, la mayor parte de las gramíneas logró recuperarse de dos a tres semanas después de la aplicación. Esta rápida recuperación indica una estrategia muy eficiente de las gramíneas para afrontar los desequilibrios que ocasiona el Phi a nivel fisiológico, y representa un desafío para su control a través del desarrollo de formulaciones con compuestos que contengan Phi con fines de uso como herbicida.

En la población de espacies de la familia Poaceae, el área foliar fue afectada de manera diferencial por los tratamientos. Al aplicar 400 mM Phi, solo un 20.38 % del follaje se observó con daños por quemadura, en tanto que al aplicar 800 mM Phi, el porcentaje de área foliar dañada se incrementó a casi 51 %. Los detalles de estas mediciones se observan en el **Cuadro 2**.

En el **Cuadro 2** también se puede observar que la población de arvenses controlada, que mostró muestre por daños fitotóxicos atribuidos al Phi fue de cerca del 6 % cuando se aplicaron 400 mM Phi, éste subió a poco más del 10 % con 800 mM Phi. No obstante, las plantas lograron recuperarse en su totalidad después de un mes de aplicados los tratamientos.

Cuadro 2. Variables de crecimiento afectadas por la aplicación de fosfito (Phi) en poblaciones de especies de la familia Poaceae (gramíneas) en el cultivo caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.

Tratamiento (mM Phi)	**Especies de la familia Poaceae (gramíneas)**	
	Área foliar afectada (%)	**Población controlada (%)**
0	0.00 c	0.00 c
400	20.38 b	5.79 b
800	50.67 a	10.23 a

* Datos documentados 48 h después de aplicados los tratamientos. Medias con letras distintas para cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$).

Es importante destacar que el cultivo de la caña de azúcar no presentó daño por las aplicaciones de Phi, en ninguna de las dosis probadas. Vale aclarar que el cultivo de caña se encontraba en fase de cosecha, y que será necesario probar su efecto en las primeras etapas de su desarrollo, desde su siembra.

CONCLUSIONES

Aunque el Phi aplicado a dosis de 400 y 800 mM ocasiona daños en el tejido foliar de las poblaciones de arvenses de la familia Poaceae en el cultivo de caña de azúcar, estas especies son capaces de recuperarse después de un mes de aplicados los tratamientos, por lo que, a estas dosis, el Phi no representa una alternativa viable para el control de arvenses de la familia Poaceae. De forma importante se encontró que el Phi no fue fitotóxico para caña de azúcar en ninguna de las dosis probadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. E. McDonald, B. R. Grant, W. C. Plaxton, “Phosphite (phosphorous acid): Its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response”, J. Plant Nutr., Vol. 24,10, 2001, pp. 1505-1519.
2. A. Herrera-Solano, R. A. Verdejo-Lara, C. J. Real-Garrido, A. Hernández-Gastelú, A. Castillo Morán, “Caracterización de las principales malezas (Poaceae) de la caña de azúcar en la zona de influencia del Ingenio La Providencia, S. A. de C. V., Veracruz”, Rev. Biol. Agrop. Tuxpan, Vol. 11, 2, 2023, pp. 1-5.
3. F. C. Gómez-Merino, L. F. Gómez-Trejo, R. Ruvalcaba-Ramírez, L. I. Trejo-Téllez, “Application of phosphite as a biostimulant in agriculture”, in *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (Elsevier, Amsterdam, 2022), Chapter 7, pp. 135-153.
4. K. Gandhi, S. Khan, M. Patrikar, A. Markad, N. Kumar, A. Choudhari, P. Sagar, S. Indurkar. “Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants”, Environ. Chal., Vol. 4, 2021, 100149.
5. L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, “Phosphite as an inductor of adaptive responses to stress and stimulator of better plant performance”, in *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants* (Springer, Singapore, 2018), Chapter 8, pp. 203-238.
6. L. I. Trejo-Téllez, V. H. Carbajal-Vázquez, J. Lavín-Castañeda, F. C. Gómez-Merino, “Phosphite as a sustainable and versatile alternative for biostimulation, biocontrol, and weed management in modern agriculture”, Processes, Vol. 12, 12, 2024, 2764.
7. M. I. Puga, C. Poza-Carrión, I. Martinez-Hevia, L. Perez-Liens, J. Paz-Ares, “Recent advances in research on phosphate starvation signaling in plants”, J. Plant Res., Vol. 137, 3, 2024, pp. 315-330.
8. M. Turek, R. Biczak, B. Pawłowska, E. Różycka-Sokołowska, K. Owsianik, B. Marciniak, P. Bałczewski P, “The need to change the approach to the safe use of herbicides by developing chiral and environmentally friendly formulations: a series of enantioselective (R)- and (S)-phenylethylammonium chloroacetates”, Green Chem., Vol. 24, 4, 2022, pp. 1693-1703.
9. PRONAC (Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar). PRONAC 2021-2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural- Comisión -Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). Ciudad de México. 84 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/709503/PROGRAMA_PRONAC_2021-2024vf_web.pdf
10. Statista. Industry revenue of “Cane sugar manufacturing in Mexico from 2012 to 2024”. https://www.statista.com/forecasts/409877/cane-sugar-manufacturing-revenue-in-mexico
11. T. Patel., M. S. Dudhat, D. Patel, J. D. Thanki. “Comparative evaluation of agronomical, mechanical and chemical management of weeds and their impact on sugarcane productivity”, Indian J. Weed Sci., Vol. 56, 2, 2024, pp. 167-175.
12. V. M. M. Achary, B. Ram, M. Manna, D. Datta, A. Bhatt, M. K. Reddy, P. K. Agrawal, “Phosphite: A novel P fertilizer for weed management and pathogen control”, Plant. Biotechnol. J., Vol. 15, 12, 2017, pp. 1493-1508.
13. W. S. Rasband, 2018. ImageJ. US National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. https://imagej.net/ij/.
14. Z. Li, X. Kong, Z. Zhang, F. Tang, M. Wang, Y. Zhao, F. Shi, “The functional mechanisms of phosphite and its applications in crop plants”, Front. Plant Sci., Vol. 16, 2025, 1538596.

VALORES DE REFERENCIA PARA LEUCOCITOS Y MICROHEMATOCRITO DE AMAZONA *Autumnalis Autumnalis* BAJO CUIDADO PROFESIONAL

Rufino Osorio Márquez[1,2], Víctor Jesús Sagrero Mora[2], Maricela Duran Ríos[2] Jesús Iván Mejía Navarro[2], Gabino Corona Patricio[2].

[1] Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, [2]Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
rufino.osorio@umich.mx

RESUMEN

La hematología aviar es una herramienta de diagnóstico sumamente importante para la detección de diversas patologías, en el género Amazona existen algunos estudios, sin embargo, hay poca información sobre la descripción morfológica de leucocitos además de los conteos porcentuales en la especie Amazona autumnalis autumnalis. La determinación de los parámetros porcentuales leucocitarios y el microhematocrito pueden variar debido al curso de procesos patológicos, pero también ambientales, de ahí que es importante que, en condiciones de cuidado profesional, cada Zoológico o Unidad de Manejo Ambiental cuente con sus valores definidos. En este estudio se recolectó muestra sanguínea de la vena basílica a n=67 ejemplares clínicamente sanos de Amazona autumnalis autumnalis del Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, en tubos microtainer con EDTA , a los cuales se les realizó la medición del microhematocrito en tubos capilares y frotis sanguíneos teñidos con solución Wright para el conteo porcentual de leucocitos. Se realizaron pruebas estadísticas para determinación del tamaño de muestra para una población finita al 95% de confiabilidad, se determinó la media, desviación estándar, error estándar de la media y los intervalos de referencia mediante el programa de Excel, paquetería Microsoft office profesional plus 2016. Los intervalos de referencia al 95% de confiabilidad fueron los siguientes: Linfocitos de 54.1%-59.01 %, heterofilos de 34.6%-39.56%, eosinófilos de 1.16-2.05%, monocitos de 1.01-1.91%, basófilos 1.92%-3.03%. El microhematocrito tuvo una media de 55.71 % un intervalo de referencia de 54.05% a 57.37 %. Este estudio es el primero que se realiza en esta especie bajo cuidado profesional y brinda información objetiva para el correcto diagnóstico clínico de patologías o procesos de salud-enfermedad.

INTRODUCCIÓN

La hematología es una herramienta fundamental y necesaria dentro de los protocolos para la evaluación del estado de salud de los individuos. Para el estudio de la sangre se realiza el hemograma o biometría hemática, en el cual se estudia la medida, forma, coloración y cantidad de los elementos formes de la sangre como eritrocitos, leucocitos y plaquetas también llamados trombocitos, de igual manera, dentro del estudio sanguíneo se encuentra la bioquímica sérica en el cual se estudia el plasma sanguíneo, cuyo análisis nos da información sobre el funcionamiento de diversos órganos y sistemas del cuerpo. La descripción morfológica, así como el conteo porcentual de las células sanguíneas en aves resulta de gran ayuda para el diagnóstico clínico de diversas patologías, (Gálvez, et al 2009). Sin embargo, encontramos algunas dificultades para el estudio del hemograma en estas especies, debido en gran medida a las características de sus células sanguíneas comparado con los mamíferos, entre ellas la presencia de eritrocitos nucleados, lo cual hace necesario que se cuenten con equipos más especializados que puedan realizar la lisis de los hematíes y medición de parámetros como la hemoglobina (Briggs C. 2009). Aunado a ello, encontramos diferencias morfológicas de los leucocitos en cuanto a mamíferos, reptiles, anfibios y peces. Esto contribuye a que exista en el mercado una baja cantidad de equipos automatizados y los especialistas en el área realicen el hemograma con métodos manuales, como el conteo de células mediante la cámara de Neubauer también llamado hemocitómetro, así como el uso de las pipetas hematológicas y soluciones especiales como las de Natt y Herrrick para el conteo leucocitario, trombocitario y de eritrocitos. Posteriormente a esto es necesario realizar frotis sanguíneos y tinciones para obtener el conteo porcentual de leucocitos.

Los leucocitos son las células sanguíneas que se encargan de la defensa del organismo contra agentes potencialmente patógenos, en las aves se han descrito 5 tipos (linfocitos, heterófilos, eosinófilos, basófilos y monocitos). El aumento o disminución, así como los cambios morfológicos y tintoriales de estas células orientan al médico hacia la interpretación de cierto diagnóstico clínico, por lo cual es necesario tener definidos los parámetros normales en individuos sanos (Avilés, et al 2015). En el presente trabajo se determinaron los intervalos de referencia al 95% de confiabilidad (Thorensen, 2009; Olascoaga et al, 2021), de los leucocitos y el microhematocrito a una población de n= 67 individuos clínicamente sanos del ave psitaciforme Amazona autumnalis autumnalis (Linaeus, 1758), también conocido como perico de mejillas amarillas o loro cariamarillo, los cuales se encuentran bajo cuidado profesional en el Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, Michoacán, México.

TEORÍA

La determinación de los valores hematológicos normales para individuos sanos es de suma importancia para la valoración médica en las aves (Soto, 2009). Sin embargo, estos valores pueden variar de acuerdo a condiciones ambientales como la altitud, la temperatura, la nutrición y las condiciones generales del individuo como edad, sexo o la presencia de padecimientos, (Gonzales, 2020).

Figura 1. Ejemplares de Amazona autumnalis autumnalis bajo cuidado profesional, albergadas en el Parque Zoológico Benito Juárez, Morelia Michoacán, México. Fuente: Elaboración propia.

En las aves sanas se puede llegar a recolectar una cantidad de sangre equivalente al 1% de su peso corporal sin perjuicio a su salud, (Walberg, 2001).
Generalmente los estudios sanguíneos incluyen la bioquímica sanguínea y la biometría hemática. Para realizar la bioquímica sanguínea existen diversos aparatos y metodologías, sin embargo, para el hemograma se siguen realizando muchas operaciones de forma manual, aunque en los últimos años han llegado al mercado equipos que aunque costosos son capaces de realizar lecturas de analitos de sangre con eritrocitos nucleados como el Cell Dyn 3500 (Walberg, 2001), la lectura del frotis sanguíneo sigue siendo una técnica de diagnóstico hematológico imprescindible en la hematología tanto de humanos como animales. Esto debido a que en un frotis sanguíneo podemos encontrar la presencia de hemoparásitos, inclusiones citoplasmáticas (Tkach, 2012), cambios morfológicos en diversas células (Ventimiglia,2017), presencia de granulación secundaria o tóxica, o en su caso el aumento o disminución de los diferentes elementos formes de la sangre, (Alvarado 2009). Además, el estudio del frotis sanguíneo es una técnica rápida y de bajo costo, que en personal capacitado y especializado es capaz de garantizar la confiabilidad de un diagnóstico morfocitómetrico que conlleve a un tratamiento adecuado en caso de enfermedades (Simón, 2019). Las células sanguíneas descritas en las aves son los eritrocitos, trombocitos y leucocitos (heterófilos, linfocitos, monocitos, eosinófilos y basófilos), Alvarado (2009), los cuales pueden llegar a variar en cuanto a morfología o número de acuerdo a su especie, (Clark et al, 2009).

Para la observación adecuada de los elementos formes de la sangre es necesario realizar un adecuado extendido en un portaobjetos (frotis sanguíneo) y la posterior tinción mediante el uso de colorantes, los mas comunes son las de tipo Romanowski como el colorante Wright, Giemsa y el Hemocrom, (Gastélum, 2021; Vargas, 2023).

El eritrocito es la célula encargada del transporte de la hemoglobina, constituye un gran porcentaje dentro de los elementos formes y es mencionado como la serie roja de la sangre, en el caso de las aves los eritrocitos son nucleados, son células ovoides con un núcleo ovoide central y un citoplasma eosinófilo de color uniforme. La forma "ovoide" varía entre especies; algunas presentan células notablemente redondeadas, mientras que otras presentan una forma más estrecha y alargada. El núcleo es ovoide y está compuesto de cromatina basófila oscura y grumosa. Los eritrocitos aviares son más grandes que los de los mamíferos. Podemos encontrar en los frotis sanguíneos los eritrocitos policromatófilos, los cuales son eritrocitos inmaduros con un citoplasma mayormente azulado, debido al aumento en la cantidad de ARN ribosómico y pueden representar hasta el 5% de los eritrocitos en aves sanas, de igual manera se pueden encontrar eritrocitos con poca maduración como los rubricitos, Los rubricitos tienen una proporción núcleo-citoplasma mayor que la de los eritrocitos maduros, con un borde de citoplasma marcadamente basófilo, de pequeño a moderado. Aunado a esto también se pueden encontrar una baja proporción de eritrocitos anucleados, menos del 1%, (Clark 2009).

El estudio de los eritrocitos constituye la parte de la biometría denominada línea roja, en ella se estudia el tamaño, volumen, morfología, coloración y presencia de hemoglobina. Una de las técnicas que nos permite conocer el porcentaje de la línea roja en la sangre es el hematocrito, el hematocrito se define como el volumen que ocupan los eritrocitos contenidos en 100 ml de sangre (expresado en porcentajes), en el presente estudio se realizó la medición del microhematocrito mediante la técnica del tubo capilar, la cual tiene la ventaja de necesitar poco volumen sanguíneo.

Los leucocitos son la línea blanca o línea de defensa del organismo, el heterófilo es el tipo de leucocitos más numerosos en aves, (Gálvez et al, 2011), son redondos, con un núcleo lobulado de cromatina densa que se tiñe de color morado. Su citoplasma es pálido y presenta gránulos de color rojo ladrillo de forma espiculada, (Morales, 2016). Estos leucocitos contienen gránulos citoplasmáticos acidófilos prominentes que se observan en las tinciones tipo Romanowski, los cuales se caracterizan por su forma fusiforme (es decir, alargada, estrechándose hacia un extremo en cada extremo) en sección longitudinal y redonda en sección transversal, y su color varía de rojo ladrillo a marrón. Los gránulos suelen estar distribuidos uniformemente en una densidad moderada a alta y, a menudo, ocultan la mayor parte del citoplasma (que es ligeramente basófilo cuando es visible) y parte del núcleo. (Clark, 2009).

El linfocito es unas células que es morfológicamente igual que en los mamíferos, en el caso de aves podemos encontrar linfocitos grandes, medianos y pequeños. Es importante la experiencia del observador ya que en muchas ocasiones los linfocitos pequeños pueden llegar a ser confundidos por trombocitos debido a su similar tamaño (Morales 2016). Los linfocitos suelen tener un núcleo redondo-ovoide compuesto de cromatina moderadamente densa y grumosa irregular, con una cantidad moderada de citoplasma sin gránulos (Agranulocitos) y moderadamente basófilo. Los linfocitos pueden presentar varios gránulos puntiformes, de azurófilos a basófilos, en su citoplasma. Regularmente estas células presentan una gran cantidad de núcleo que cubre casi toda la célula y un porcentaje muy pequeño de citoplasma. (Clark 2009). El aumento o disminución en su numero es importante para el medico diagnosta ya que deberá descartar leucemia linfocítica, estrés, inflamaciones, infecciones virales, entre otros.

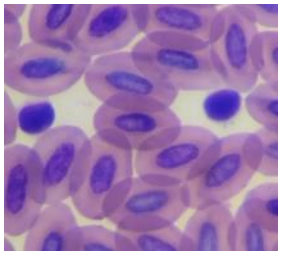
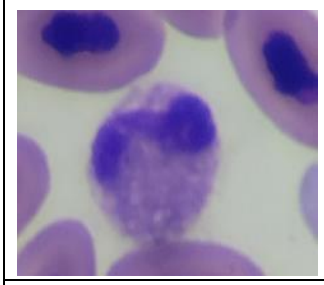
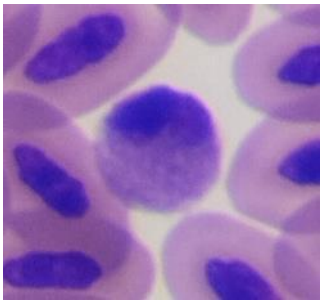
Los monocitos son leucocitos agranulocitos que tienen comúnmente núcleo irregular basofilico con cromatina compacta, el citoplasma es ligeramente basofilico con presencia de múltiples vacuolas, el monocito suele ser el leucocito de mayor tamaño en las aves y mamíferos. Normalmente suelen encontrarse en baja cantidad en los frotis sanguíneos aviares 0-3%, su aumento se ha asociado a infecciones crónicas, clamidiasis, infecciones por micobacterias y por Aspergillus sp. Cabe mencionar que el no encontrar estas células en un frotis sanguíneo suele ser completamente normal, (Phillip, 2009; Gálvez, et al 2011 y Albarracín, 2015).

Los eosinófilos en aves son muy parecidos a los heterófilos (acidófilos), los hematólogos sin experiencia suelen confundir los eosinófilos con los heterofilos (Clark, 2009), son células redondeadas e irregulares, similar al tamaño de los heterófilos, con citoplasma azul claro y núcleo bilobulado, los eosinófilos contienen gránulos citoplasmáticos redondos, las cuales en general son más brillantes que en los heterófilos, sin embargo, la morfología de los eosinófilos puede variar con respecto a las diferentes especies de aves, (Mitchell y Jones 2008). El aumento en el número de eosinófilos se ha asociado a parasitosis por Giardia sp, ascaridos y cestodos, sin embargo, a diferencia de los mamíferos, en las aves no se ha reportado eosinofilia por hipersensibilidad o enfermedades autoinmunes, de igual manera no encontrar eosinófilos en sangre periférica suele ser normal (Gálvez, et al 2011).

Los basófilos son de tamaño un poco mas pequeño que los heterofilos y eosinófilos, contienen gránulos altamente basofilicos en su citoplasma, de igual manera el núcleo es basofilico, el aumento en su numero se ha asociado a inflamaciones crónicas e infecciones respiratorias (Gálvez, et al 2009).

Los trombocitos son elementos formes de la sangre que se encargan de la hemostasia, son más pequeños que los eritrocitos y los leucocitos, son nucleadas, tienen un núcleo que es ovoide con citoplasma de moderado tamaño, incoloro, gris pálido o basófilo pálido. En muchas ocasiones presentan prolongaciones citoplasmáticas o pseudópodos, (Clark, 2009).

A continuación, se describen las células sanguíneas de Amazona autumnalis autumnalis.

Célula	Descripción
Trombocitos 	Los trombocitos son las células encargadas de la coagulación sanguínea, en Amazona atumnalis autumnalis son más pequeños que los eritrocitos, poseen escaso citoplasma y el núcleo es basofílico de cromatina densa.
Heterófilo 	El heterófilo es el leucocito más abundante, al teñirse con colorantes de tipo Romanowski se le observa un citoplasma ligeramente basofilico, donde abundan gránulos acidófilos que adquieren una coloración que va de naranja a rosa, los gránulos característicos son de aspecto elongado, sin embargo, en el caso de Amazona autumnalis autumnalis encontramos gránulos ligeramente más redondeados que en otras especies de aves. Además, encontramos el núcleo el cual contiene cromatina compacta altamente basofílica y que normalmente aparece bilobulado o en forma de banda.
Eosinófilo 	Los eosinófilos son células de tamaño semejante a los heterófilos, e incluso llegan a tener la misma coloración citoplasmática y de sus gránulos, la diferencia radica en que los gránulos citoplasmáticos de los eosinófilos son de forma redonda muy visibles a simple inspección. El núcleo del eosinófilo puede ser bilobulado o en banda y posee cromatina densa altamente basofílica.

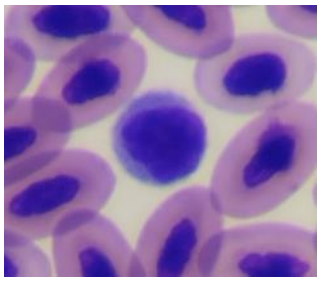
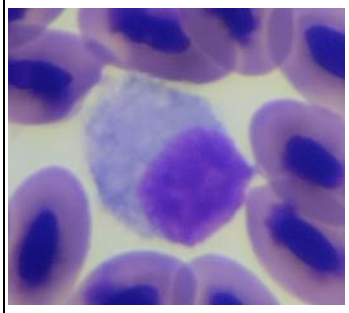
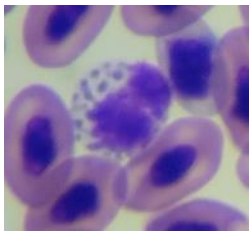
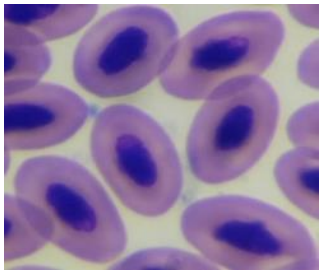
Linfocito 	Los linfocitos son la segunda de leucocitos en porcentaje en un frotis sanguíneo en Amazona autumnalis autumnalis, existen grandes, medianos y pequeños, el de la imagen es un linfocito pequeño, es de aspecto redondo, con escaso citoplasma, sin gránulos citoplasmáticos y núcleo que cubre gran parde de la célula, de aspecto basofilico uniforme. Los linfocitos tienen la misma morfología tanto en mamíferos, reptiles y aves.
Monocito 	El monocito es el leucocito de mayor tamaño, suele poseer un núcleo prominente e irregular, el citoplasma es agranulocito, azul tenue, con presencia de abundantes vacuolas.
Basófilo 	Los basófilos son leucocitos de tamaño semejante a heterofilos y eosinófilos, su característica principal es que poseen una gran cantidad de gránulos citoplasmáticos que con colorantes de tipo Romanowski adquieren una tonalidad azul intenso. Su núcleo es basofilico con cromatina compacta, puede ser redondo o bilobulado, en muchas ocasiones suele ser opacado por la presencia de los gránulos y no se llega a distinguir. Los gránulos citoplasmáticos basofilicos son hidrosolubles, por lo que un prolongado tiempo de enjuague de la laminilla resulta perjudicial para su observación adecuada.
Eritrocitos 	Los eritrocitos en Amazona autumnalis autumnalis son elongados con núcleo central ovoide, de citoplasma azul pálido o grisáceo, y núcleo con cromatina laxa o densa dependiendo del estado de madurez.

Tabla 1. Descripción de los elementos formes de la sangre de Amazona autumnalis autumnalis.
Fuente: Elaboración propia.

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en el Parque Zoológico “Benito Juárez” de Morelia, localizado en la calzada Juárez sin número, colonia Félix Ireta, C.P 58070, Morelia, Michoacán, México, en el mes de Junio del 2024.

Las tomas de muestras se realizaron a 71 ejemplares de Amazona autumnalis autumnalis que se encuentran bajo cuidado profesional.

Los animales fueron contenidos físicamente para la recolección de muestras por el personal capacitado de la Unidad Operativa de Atención a Aves, los médicos veterinarios realizaron la exploración física, seleccionando únicamente a individuos clínicamente sanos y se descartaron aquellos que se mostraban estresados o con signos de enfermedad. Se les extrajo sangre de la vena basílica por medio de una jeringa de 1 ml de aguja desmontable, posteriormente se recolectó la sangre en tubos microtainer de 500 microlitros con EDTA para su análisis en el laboratorio.

De los tubos con EDTA una vez homogenizados se realizaron frotis sanguíneos y tinciones con el colorante Wright, además, para la medición por la técnica de microhematocrito de este mismo microtainer se extrajo muestra con tubos capilares con EDTA, los cuales fueron sellados con calor y posteriormente se llevaron a centrifugación a 3500 revoluciones por minuto durante diez minutos, (Soto, 2009), posteriormente la revisión de los frotis sanguíneos para el conteo diferencial de leucocitos se realizó en el laboratorio, mediante la ayuda de un Microscopio clínico modelo Velab-B7 y un piano contador de células.

RESULTADOS

Mediante el programa de Excel, paquetería office 2016, Se determinó el tamaño de la muestra para una población finita de 71 individuos, en el cual el valor fue n=67 individuos, posteriormente se determinaron la media, desviación estándar, error estándar de la media, el valor más bajo, el valor más alto y los intervalos de confianza para la media al 95%, (Castilla, 2011; Olascoaga, et al 2021), obteniéndose los siguientes resultados.

Analitos	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media	Valor más bajo	Valor más alto	Tamaño de la muestra	Extremo inferior del Intervalo de confianza al 95%	Extremo superior del Intervalo de confianza al 95%
Microhematocrito	55.71507463	6.913592973	0.844629812	42	72	67	54.0596002	57.37054906
Linfocitos	57.05970149	12.33482456	1.506938662	18	81	67	34.60716418	39.56871331
Heterófilos	36.56716418	12.53507066	1.531402617	12	79	67	34.60716418	39.56871331
Monocitos	1.462686567	1.92533632	0.235217268	0	10	67	1.01	1.91
Basófilos	2.47761194	2.311750019	0.282425215	0	10	67	1.924058518	3.031165362
Eosinófilos	1.611940299	1.858275707	0.227024511	0	8	67	1.166972258	2.056908339

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico de microhematocrito y leucocitos en Amazona autumnalis autumnalis bajo cuidado profesional. Fuente: Elaboración propia.

Este es el primer estudio llevado a cabo en México con respecto a esta especie, ya que existen algunos trabajos como los realizados por Herrera (2013) en Colombia, por Alvarado (2008) en Venezuela y los realizados por Mérida y Centeno en Guatemala (2011), con los cuales se encontraron bastantes similitudes como la cuestión de que los heterofilos sean los leucocitos más numerosos, seguidos de los linfocitos, así como la baja cantidad de monocitos, basófilos y eosinófilos. Cabe señalar que para términos prácticos y de acuerdo a autores como Gálvez (2009), Clark (2009) y Phillips (2011) los Monocitos, eosinófilos y basófilos pueden tener valores de cero por ciento de manera normal por lo que en este estudio los valores de referencia serian para monocitos de 0-2%, eosinófilos de 0-2% y basófilos de 0-3%.

CONCLUSIONES

La determinación de los valores de referencia de los analitos sanguíneos para Amazona autumnalis autumnalis que se realizaron en este trabajo brindan objetividad para establecer diagnósticos médicos más precisos en los ejemplares bajo cuidado profesional que se encuentran en el Parque Zoológico Benito Juárez.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, M. C., Arraga-Alvarado, C., Rincón Rincón, M., Fernández, G., Aguilar Lara, J., Villasmil-Ontiveros, Y., Gómez, O., Henriquez, A., "Valores hematológicos de psitácidos de los géneros Ara y Amazona cautivos en zoológicos de Venezuela," *Rev. Cient. FCV-LUZ*, Vol. 18, No. 6, 2008, pp. 649–661.
2. Avilez Colón, B. L., Rugeles Pinto, C. C., Jabib Ruiz, L., & Herrera Benavides, Y. M., "Parámetros hematológicos en pollos de engorde criados en una granja de producción cerrada en el trópico bajo," *Rev. Med. Vet.*, Vol. 29, 2015, pp. 33–39.
3. Briggs, C., "Quality counts: new parameters in blood cell counting," *Int. J. Lab. Hematol.*, Vol. 31, No. 3, 2009, pp. 277–297.
4. Castilla Serna, L., *Manual práctico de estadística para las ciencias de la salud*, 1.ª ed., México: Trillas, 2011, 168 pp.
5. Clark, P., Boardman, W., & Raidal, S., *Atlas of Clinical Avian Hematology*, Wiley-Blackwell, Oxford, 2009, 184 pp., ISBN 978-1-4051-9248-4.
6. Claver, J. A., "El trombocito aviar," *InVet*, Vol. 7, No. 1, 2005, pp. 139–146
7. Gálvez Martínez, C. F., Ramírez Benavides, G. F., & Osorio, J. H., "El laboratorio clínico en hematología de aves exóticas," *Biosalud*, Vol. 8, No. 1, 2009, pp. 178–188.
8. Gastélum Máynez, M. G., *Manual de prácticas de inmunología veterinaria*, Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, 2021.
9. Hawkey, C. M., Dennett, T. B., *Atlas de Hematología Veterinaria Comparada: Células Sanguíneas Normales y Anormales en Mamíferos, Aves y Reptiles*, 1.ª ed., Madrid: Grass, 1989, p. 250.
10. Herrera, J. A., Avalos, A., Herrera, G., Gómez, D., Varela, A., Guzmán, A., & Rosales, A. M., "Parámetros hematológicos en polluelos de psitácidos en cautiverio de origen silvestre," *Rev. Med. Vet. Zoot.*, Vol. 60, No. 2, 2013, pp. 79–85.
11. Olascoaga-Elizarraraz, A., Servín Zamora, E., Nogueira Marmolejo, M. G., Ojeda Chávez, J., Alcaraz Sosa, L. E., Díaz Negrete, M. T., López Montaño, M., Ducoing Watty, A., Majluf Trejo, A. D., Maldonado-Reséndiz, R. I., "Estimación de parámetros hematológicos en ajolote de Xochimilco (Ambystoma mexicanum) bajo cuidado humano en el Zoológico de Chapultepec, México," *Rev. Latinoam. Herpetol.*, Vol. 4, No. 1, 2021, pp. 95–104. https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2021.1.198
12. Ruiz, G., Torrez, C., "Valores hematológicos, química sérica y descripción de células sanguíneas del cóndor andino (Vultur gryphus) cautivos en el Zoológico Vesty Pakos, de La Paz, Bolivia," *Rev. Cs. Farm. Bioqu.*, Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 35–48.
13. Simón Pita, A. M., "Importancia de la morfología en el diagnóstico hematológico," *Rev. Cubana Hematol. Inmunol. Hemoter.*, Vol. 35, No. 3, 2019.
14. Soto Piñeiro, C. J., Acosta Guevara, I., Cruz López, E., "Parámetros hematológicos de Cotorras (Amazona leucocephala) y Cateyes (Aratinga euops)," *REDVET. Rev. Electrón. Vet.*, Vol. 10, No. 7B, 2009, pp. 1–10.
15. Thoresen, S. I., Arnemo, J. M., y Liberg, O., "Hematology and serum clinical chemistry reference intervals for free-ranging Scandinavian gray wolves (Canis lupus)," *Vet. Clin. Pathol.*, Vol. 38, No. 2, 2009, pp. 224–229.
16. Tkach, A. D., Moreno, J. D., & Bava, A. J., "Diagnóstico presuntivo de histoplasmosis en un frotis sanguíneo," *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana.*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 677–682.
17. Vargas, W. M., & Vargas, A. M., "Imagen: Frotis de sangre periférica," *Rev. Fac. Med. Univ. Iberoam.*, Vol. 1, No. 1, 2023, pp. 5–velab.com/es/blogs/news/las-celulas-sanguineas-una-mirada-a-la-aplicacion-del-conteo-celular.
18. Ventimiglia, F. D., Rivas-Ibargüen, M. A., Vildoza, A., y Orsilles, M. Á., "Valor diagnóstico de la morfología eritrocitaria en las anemias," *Acta Bioquím. Clínica. Latinoamericana.*, Vol. 51, No. 3, 2017, pp. 379–386.
19. Walberg, J., "White blood cell counting techniques in birds," *Semin. Avian Exot. Pet Med.*, Vol. 10, No. 2, 2001, pp. 72–76.

INCIDENCIA DE PROTOZOARIOS PARÁSITOS GASTROINTESTINALES EN PRIMATES BAJO CUIDADO PROFESIONAL

Lisset Guadalupe Bedolla Camacho [1], David Tafolla Venegas [2], Rufino Osorio Márquez [2] y Maricela Duran Ríos [2]

[1] Facultad de Biologia UMSNH, [2] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
lisset.7673@gmail.com

RESUMEN

Los zoológicos realizan actividades de educación ambiental, conservación e investigación de las especies que se encuentran en peligro de extinción, también forman parte de los programas de introducción y reintroducción. Muchas de las especies de primates se encuentran en peligro de extinción ya que son especies altamente susceptibles a la degradación del hábitat y están continuamente en interacción con humanos y otras especies. El parasitismo es una de las enfermedades con mayor frecuencia en los primates, siendo los protozoarios el mayor riesgo de transmisión debido a su gran variedad, ciclo de vida y adaptación a diferentes ambientes. En este estudio se realizaron análisis coprológicos a 17 especies de primates bajo cuidado profesional del Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, para la identificación de protozoarios, realizándose dos muestreos, dando un total de 59 muestras, a cada una de estas se les realizó 4 técnicas coprológicas: (1) Organoléptica, (2) Observación en fresco con una solución salina fisiológica, NaCl al 0.9%, (3) Observación con Lugol y (4) la técnica de concentración por centrifugación. Obteniendo una incidencia de protozoarios de 57.63%, donde se identificaron siete géneros: *Entamoeba histolytica/dispar* (35.59%), *Entamoeba coli* (22.03%), *Balantidium spp.* (20.34%), *Trichomonas spp.* (10.17%), *Cystoisospora spp*. (3.39%), *Eimeria spp.* (1.69%) y *Sarcocystis spp.* (1.69%). Las especies de primates de mayor incidencia de protozoarios fueron cuatro: *Erythrocebus patas*, *Macaca nemestrina*, *Macaca tonkeana* y *Mandrillus sphinx* (100%) continuando con *Macaca fuscata* (75.0%), *Alouatta pigra*, *Pan troglodytes*, *Pan paniscus*, *Chlorocebus aethiops*, *Sapajus robustus*, *Sapajus nigritus*, *Lémur catta* y *Macaca fascicularis* con (50.0%), *Papio hamadryas* (40.0%), *Ateles geoffroyi* y *Cebus capucinus* con (20.0%), y la única especie que resultó negativa a la presencia de protozoarios fue *Papio anubis* (0.0%). También se determinó monoparasitismo (33.90%), biparasitismo (11.86%), triparasitismo (10.17%) y tetraparasitismo (1.69%) con un solo caso en *Sapajus robustus*. Se observó una alta incidencia de parasitosis por protozoarios, siendo la más importante las amebiasis, seguida de protozoarios ciliados y flagelados, y con una baja incidencia de coccidias intestinales. Este estudio aporta elementos necesarios para un programa de desparasitación así como el conocimiento de la población de parásitos protozoarios existentes en primates bajo cuidado profesional, lo cual debe tomarse en cuenta en los programas de conservación y reintroducción de estas especies.

INTRODUCCIÓN

Los zoológicos son establecimientos de exhibición de animales en donde se realizan actividades de educación ambiental, conservación e investigación de la mayoría de las especies de animales, principalmente de las que se encuentran en peligro de extinción, llevándose también a cabo programas de introducción y reintroducción. (Beltrán et al., 2009)

Muchas de las especies de primates se encuentran en peligro de extinción, por lo cual es un grupo que se tienen que mantener bajo vigilancia epidemiológica ya que estas especies son altamente susceptibles a la degradación de hábitat y están continuamente en interacción con humanos y otras especies. (Roncancio-Duque et al., 2013)

Una de las enfermedades más frecuentes en el orden de primates es el parasitismo, esto llega a facilitar infecciones secundarias, aunque muchas de las veces son de naturaleza no patógena (Ordóñez, 2012). Siendo los protozoarios un gran riesgo para la salud ya que tienen una amplia

distribución, se encuentran en vida libre y otros como parásitos de animales y plantas. Son microscópicos, unicelulares y se localizan en diferentes tejidos. Algunos son inofensivos y en ciertos casos provocan la muerte del huésped. (Botero, 2012)

Las parasitosis se pueden presentar y condicionar por varios factores: genéticamente ya que algunas especies son más susceptibles que otras, la socialización, en este caso los primates son vulnerables por su contacto constante con los humanos, los factores nutricionales del huésped ya que los parásitos utilizan estos nutrientes, la respuesta inmunológica del huésped, los factores etológicos como los hábitos, costumbres, así como el estrés y la higiene. (Saredi, 2002)

Factores ambientales como el suelo y la humedad son de primordial importancia ya que pueden actuar como un huésped intermediario, al igual que el agua, que puede actuar como vehículo o como alojamiento para que se lleve a cabo el desarrollo de un huésped intermediario y las condiciones geográfico-climáticas como las lluvias, la temperatura, la vegetación, la altitud, la latitud entre otros. (Saredi, 2002)

Los factores mencionados pueden favorecer o no al ciclo de vida de los parásitos, también a esto hay que tomar en cuenta la gran adaptabilidad de los mismos, de ahí la importancia de tener programas de monitoreo coproparasitológicos como el presente estudio en primates. (Figura 1)

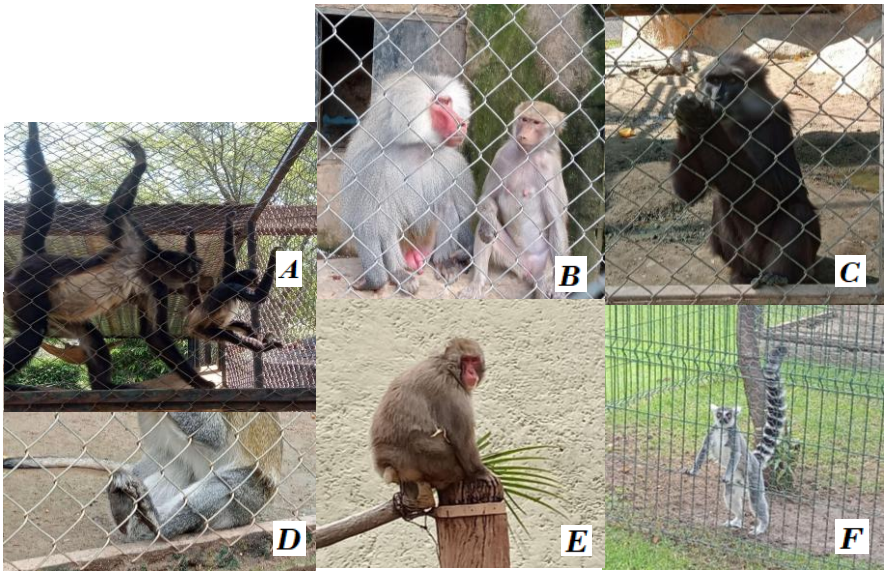


Figura 1. Imágenes de algunas de las especies que se encuentran en el PZBJ de Morelia, Michoacán: **(A)** Mono araña **(*Ateles geoffroyi*), (B)** Pareja de Papiones Sagrado **(*Papio hamadryas*)**, **(C)** Macaco de Tonkeana **(*Macaca tonkeana*)**, **(D)** Mono verde **(*Chlorocebus aethiops*)**, **(E)** Macaco Japonés **(*Macaca fuscata*)**, **(F)** Lémur de cola anillada **(*Lémur catta*)**. Fuente: Elaboración propia.

TEORÍA

Existen algunos reportes de estudios de parásitos gastrointestinales en primates bajo cuidado profesional como el realizado en el zoológico de Ecuador por Solórzano en 2023, donde hubo 19 de 21 primates con la presencia de parásitos, dando una incidencia parasitaria de 90.47%, siendo el protozoario de mayor incidencia *Entamoeba coli* y *Entamoeba histolytica* con 28.57%, seguido de *Giardia spp* con 19.05% y *Eimeria spp* en un 4.76%. (Solórzano, 2023).

En otro estudio realizado por Gual en 1990 en el zoológico de Chapultepec de la ciudad de México muestrearon 20 especies y el 100% resultó positivo a parasitosis, se identificaron 13 especies de parásitos (6 protozoarios, 5 nematodos y 2 cestodos), existiendo una mayor presencia de

protozoarios, siendo la especie de mayor incidencia *Entamoeba histolytica* con 62.7%, seguido de *Entamoeba coli (*30.5%), *Endolimax nana* (23.7%), *Giardia lamblia* (10.1%), *Balantidium coli* (3.3%) y *Iodamoeba bütschlii* también en un 3.3% (Gual, 1990).

Zapata-Valencia y colaboradores en el 2021 determinaron la presencia de enteroparásitos en primates pertenecientes al zoológico de Cali Colombia, recolectaron muestras de 40 individuos de siete especies de primates dando como resultado que un 100% presentó parasitosis, y el parásito con mayor prevalencia fue *Blastocystis spp* (75%), *Trichomonas spp* (27.5%), *Giardia spp* (27.5%), *Entamoeba spp* (25%), *Strongyloides spp* (15%), Cyclospora sp. (5%) y *Trichuris sp* (2.5%), siendo los protozoarios los parásitos con mayos presencia en los primates. También en este trabajo se vio la existencia de poliparasitismo pero aun así hubo una mayor incidencia de monoparasitismo con un 42.8%, biparasitismo en un 25%, triparasitismo también con 25% y tetraparasitismo en un 6.2%, con un solo caso (Zapata-Valencia et al., 2021).

Este estudio constituye el primero en reportarse en el Zoológico de Morelia en el caso de primates bajo cuidado profesional y se ha centrado en la búsqueda de protozoarios, esto tomando en cuenta el constante contacto que existe entre primates y los cuidadores humanos, así como indirectamente con los visitantes, dándose el riesgo de transmisión de parásitos entre ambos, especialmente de protozoarios como *Balantidium coli, Entamoeba coli*, *Entamoeba histolytica* y *Giardia spp.* (Guerrero et al., 2012).

PARTE EXPERIMENTAL

Para el presente trabajo se realizó un estudio coproparasitológico a 17 especies de primates bajo cuidado profesional presentes en el Parque Zoológico “Benito Juárez” de Morelia Michoacán (Tabla 1). Se realizaron 2 muestreos parasitológicos, en los 3 primeros días del mes de mayo y en el mes de junio del año 2024. Cuyo objetivo fue determinar la incidencia parasitaria de protozoarios gastrointestinales.

Mono aullador negro / ***Alouatta pigra*** (Lawrence, 1933)
Mono araña / ***Ateles geoffroyi*** (Kuhl, 1820).
Chimpancé común / ***Pan troglodytes*** (Blumenbach, 1775)
Chimpancé Pigmeo / ***Pan paniscus*** (Schwarz, 1929)
Mono verde / ***Chlorocebus aethiops*** (Linnaeus, 1758)
Capuchino crestado / ***Sapajus robustus*** (Kuhl, 1820)
Mono capuchino carablanca / ***Cebus capucinus*** (Linnaeus, 1758)
Capuchino de cuernos / ***Sapajus nigritus*** (Goldfuss, 1809)
Mono patas / ***Erythrocebus patas*** (Schreber, 1775)
Lémur de cola anillada / ***Lémur catta*** (Linnaeus, 1758)
Macaco cola de cerdo / ***Macaca nemestrina*** (Linnaeus, 1766)
Macaco de tonkeana / ***Macaca tonkeana*** (Meyer, 1899)
Macaco cangrejero / ***Macaca fascicularis*** (Raffles, 1821).
Macaco Japonés / ***Macaca fuscata*** (Blyth, 1875)
Mandril / ***Mandrillus sphinx*** (Linnaeus, 1758)
Papión sagrado / ***Papio hamadryas*** (Linnaeus, 1758).
Babuino / ***Papio anubis*** (Erxleben, 1777)

Tabla 1. Listado de las 17 especies de primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

Las muestras se recolectaron por la mañana cuidando que fueran frescas y con ayuda de los cuidadores se tomaron del suelo de los albergues, pero solo de la parte superior de las heces para evitar una posible contaminación (Ordóñez, 2012). Se colectaron un total de 59 muestras fecales, de cada albergue se recolectaron entre 1 a 3 muestras dependiendo de la cantidad de individuos que se encontraban en cada albergue, las heces fecales se colocaron en bolsas de plástico con su respectiva etiqueta y se transportaron al laboratorio del Parque zoológico “Benito Juárez” para realizarles las pruebas coprológicas y las que no se procesaron al momento fueron refrigeradas hasta el momento que se procesaran.

A cada una de las 59 muestras se les realizó cuatro pruebas coprológicas: (1) Organoléptica, (2) Observación en fresco con una solución salina fisiológica (NaCl al 0.9%), (3) observación con Lugol y (4) la técnica de concentración por centrifugación. (Figura 2)

(1) Prueba Organoléptica: Se realizó un registro del color, aroma y consistencia.

(2) Observación en fresco con una solución salina fisiológica (NaCl al 0.9%): Se tomó aproximadamente 1 gr de la muestra fecal y se diluyó en solución salina fisiológica, hasta tener una muestra homogénea, después se colocó una gota de esta preparación en un portaobjetos y colocamos un cubreobjetos y se observa al microscopio en 10x y 40x.

Esta técnica nos permite saber si existe la presencia de protozoarios en su forma móvil de trofozoítos (amebas, flagelados o ciliados) y también larvas de nematodos y similares, ya que estos pueden quedar distorsionados o incluso destruidos por la presencia de lugol o por el método de sedimentación. (Bowman, 2011)

(3) Observación con Lugol: Para esta técnica se toma una gota de la preparación anterior con solución salina y se coloca una gota en un portaobjetos, posteriormente una gota de lugol y un cubreobjetos. Se observó al microscopio en 10x y 40x.

El lugol nos permite una mejor visibilidad de los quistes de protozoarios. (Solórzano, 2023)

(4) Técnica de concentración por centrifugación: Para esta técnica se colocó en un tubo de ensayo la muestra con solución salina fisiológica, posteriormente se llevó a la centrífuga durante 5 minutos a 3500 revoluciones por minuto, cuando terminó la centrifugación la muestra se decantó y se tomó una gota de la sedimentación colocándola en el portaobjetos con una gota de lugol y un cubreobjetos, observándose al microscopio en 10x y 40x.

La técnica se encarga de eliminar la mayor parte de los residuos fecales permitiéndonos tener una mejor visibilidad de trematodos y acantocéfalos, amebas y ciliado en su forma de quiste. (Bowman, 2011)

Figura 2. Técnicas implementadas en el laboratorio del PZBJ para determinar la presencia de parásitos protozoarios de primates bajo cuidado profesional. Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

El análisis demostró la presencia o ausencia de parásitos protozoarios gastrointestinales en las 17 especies de primates bajo cuidado profesional, resultando que en 16 (94.12%) de las 17 especies resultaron positivas a protozoarios y solo una especie negativa (5.88%). (Tabla 2 y figura 3)

Especies de primates	Presencia de Protozoarios	Ausencia de Protozoarios
Alouatta pigra	*	
Ateles geoffroyi	*	
Pan troglodytes	*	
Pan paniscus	*	
Chlorocebus aethiops	*	
Sapajus robustus	*	
Cebus capucinus	*	
Sapajus nigritus	*	
Erythrocebus patas	*	
Lémur catta	*	
Macaca nemestrina	*	
Macaca tonkeana	*	
Macaca fascicularis	*	
Macaca fuscata	*	
Mandrillus sphinx	*	
Papio hamadryas	*	
Papio anubis		*
	94.12%	**5.88%**

Tabla 2. Presencia y ausencia de parásitos protozoarios en las 17 especies de primates presentes en el PZBJ

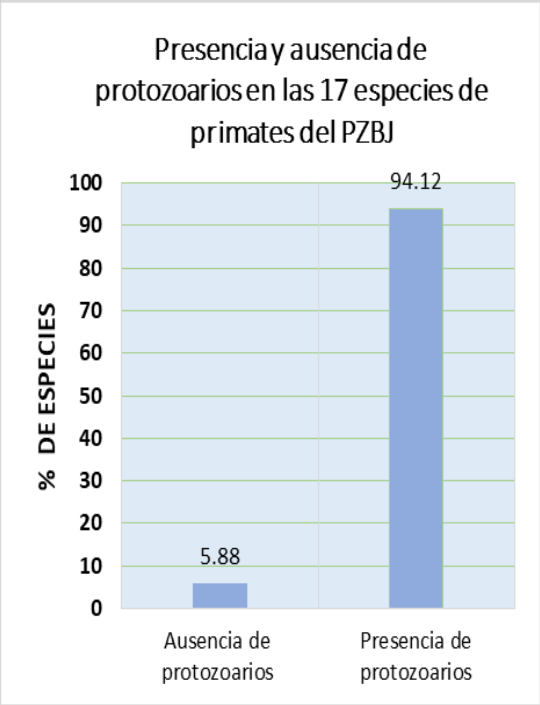


Figura 3. Presencia y ausencia de parásitos protozoarios en las 17 especies de primates en el PZBJ (%)

En la figura 4 se muestra la incidencia parasitaria de protozoarios en las 59 muestras coprológicas analizadas independientemente de la especie de primate. Arrojando que el 57.63% (34/59) de las muestras fueron positivas por lo menos a un tipo de protozoarios y el 42.37% (25/59) fueron muestras negativas a protozoarios.

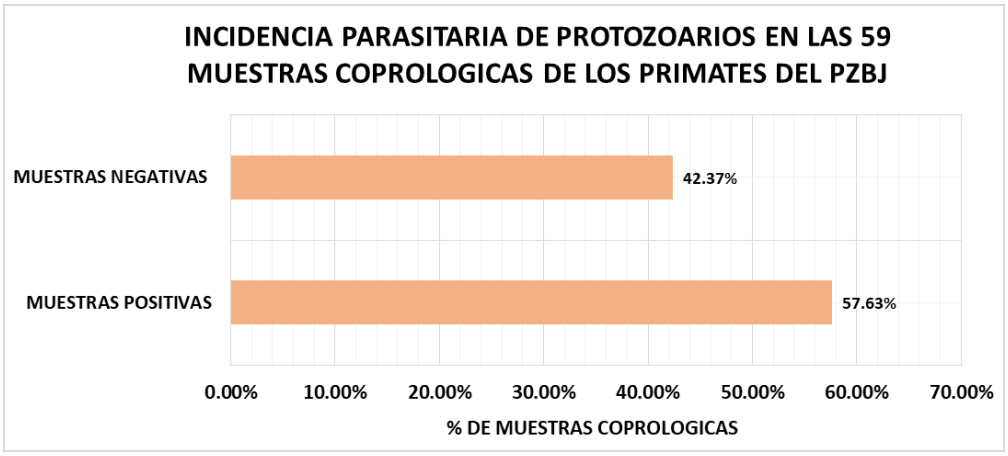


Figura 4. Incidencia parasitaria de protozoarios en las 59 muestras coprológicas de los primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

En la figura 5 se muestra una gráfica de la incidencia parasitaria de protozoarios de cada una de las especies de primates del parque zoológico “Benito Juárez” de Morelia, Michoacán. Las especies de mayor incidencia de protozoarios fueron cuatro: ***Erythrocebus patas***, ***Macaca nemestrina***, ***Macaca tonkeana*** y ***Mandrillus sphinx*** con un 100%, continuando con ***Macaca fuscata*** (75.0%), ***Alouatta pigra***, ***Pan troglodytes***, ***Pan paniscus***, ***Chlorocebus aethiops***, ***Sapajus robustus***, ***Sapajus***

nigritus, ***Lémur catta*** y ***Macaca fascicularis*** con 50.0%, ***Papio hamadryas*** con 40.0%, ***Ateles geoffroyi*** y ***Cebus capucinus*** con un 20.0%, y la única especie que resultó negativa a la presencia de protozoarios fue ***Papio anubis*** (0.0%).

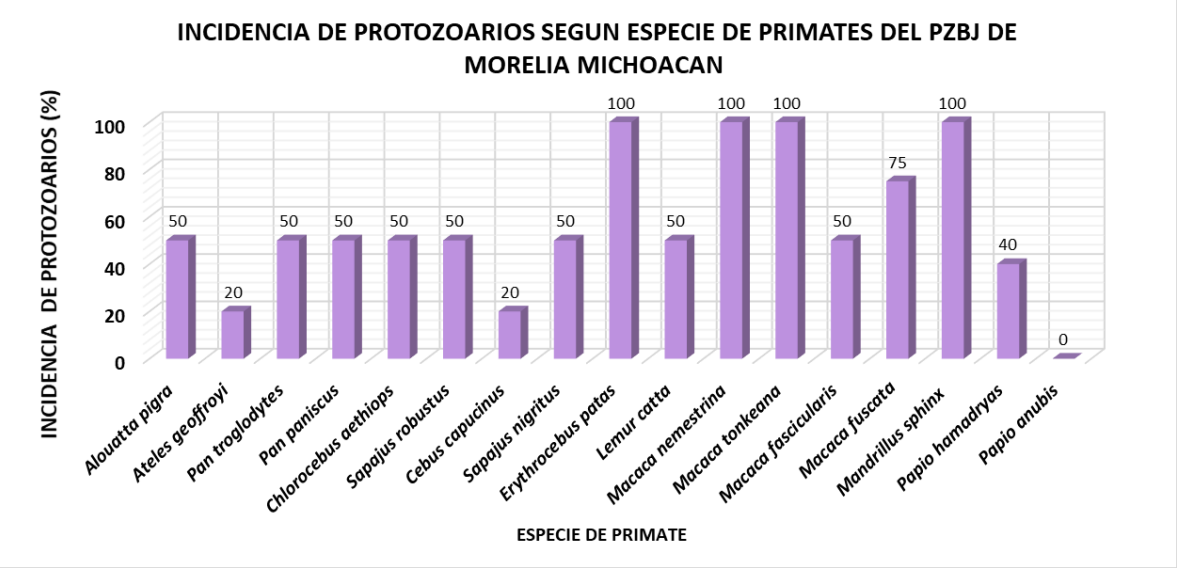


Figura 5. Incidencia de protozoarios por especie de primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

En la tabla 3 se muestra la incidencia parasitaria con el número de muestras que se recolectaron en los dos muestreos por cada una de las especies de primates, el número de casos positivos y negativos a protozoarios, así como el porcentaje de estos.

ESPECIES DE PRIMATES	N° de muestras	Positivo		Negativo	
		N°	%	N°	%
Alouatta pigra	2	1	*50*	1	*50*
Ateles geoffroyi	5	1	*20*	4	*80*
Pan troglodytes	4	2	*50*	2	*50*
Pan paniscus	2	1	*50*	1	*50*
Chlorocebus aethiops	2	1	*50*	1	*50*
Sapajus robustus	4	2	*50*	2	*50*
Cebus capucinus	5	1	*20*	4	*80*
Sapajus nigritus	4	2	*50*	2	*50*
Erythrocebus patas	4	4	*100*	0	*0*
Lémur catta	4	2	*50*	2	*50*
Macaca nemestrina	2	2	*100*	0	*0*
Macaca tonkeana	4	4	*100*	0	*0*
Macaca fascicularis	2	1	*50*	1	*50*
Macaca fuscata	4	3	*75*	1	*25*
Mandrillus sphinx	5	5	*100*	0	*0*
Papio hamadryas	5	2	*40*	3	*60*
Papio anubis	1	0	*0*	1	*100*

Tabla 3. Número de casos tanto positivos como negativos a protozoarios y también en porcentaje de cada una de las especies de primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

Se identificaron siete géneros de protozoarios: Siendo ***Entamoeba histolytica/dispar*** con un 35.59% la especie con mayor incidencia, seguido de ***Entamoeba coli*** (22.03%), ***Balantidium spp.*** (20.34%), ***Trichomonas spp***. (10.17%), ***Cystoisospora spp***. (3.39%), ***Eimeria spp***. (1.69%) y ***Sarcocystis spp***. con 1.69% el de menor incidencia. (Figura 6 y figura 7)

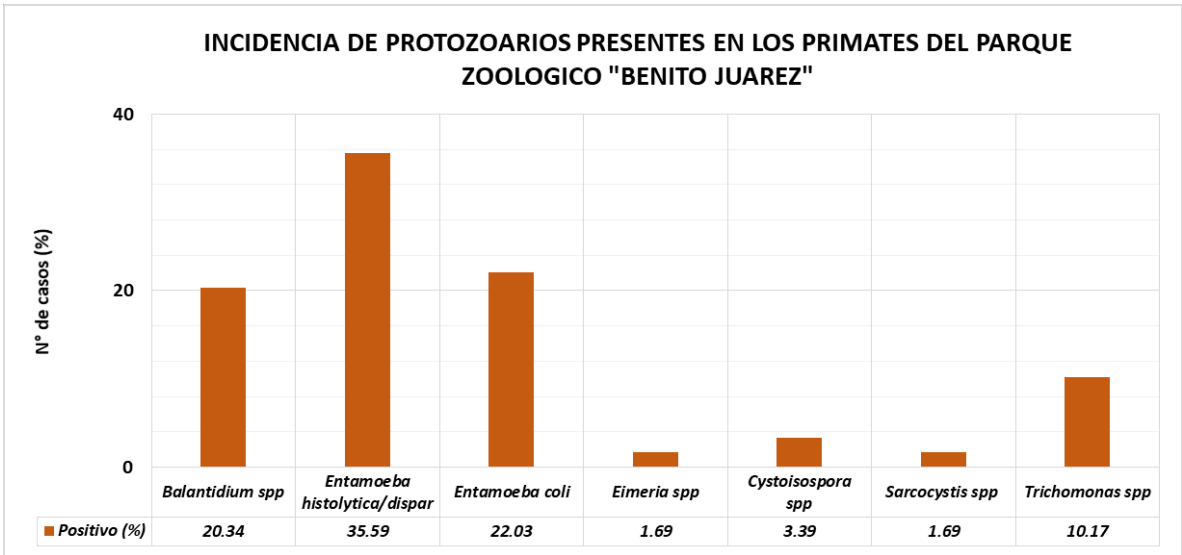


Figura 6. Incidencia de protozoarios presentes en los primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

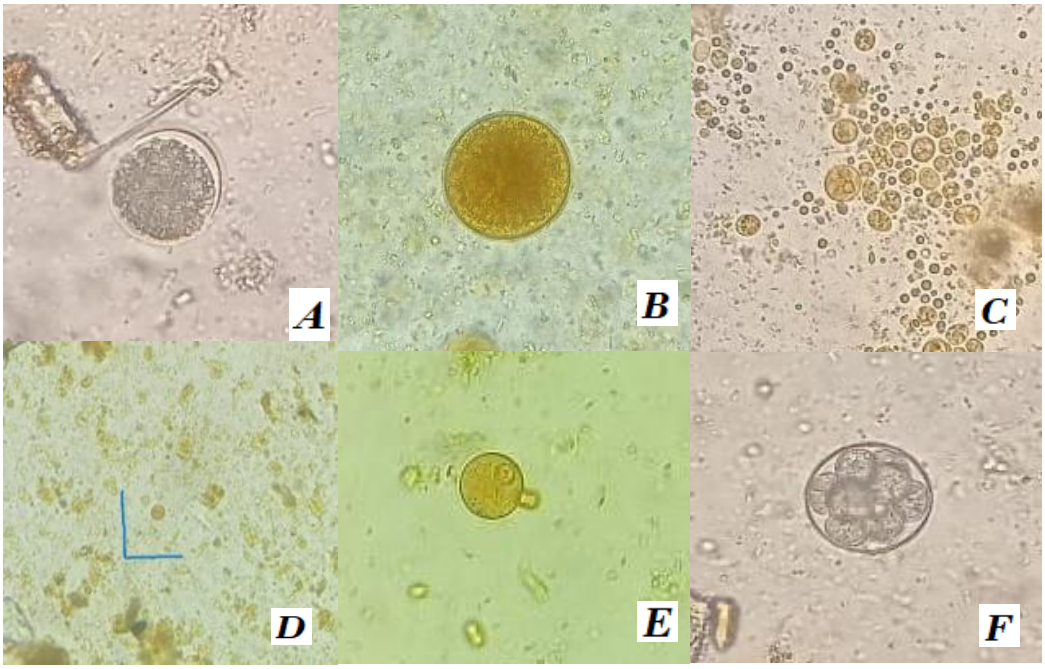
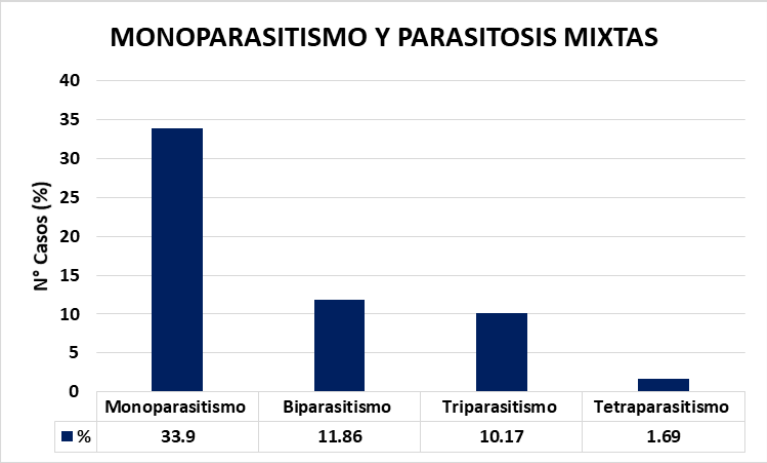


Figura 7. Imágenes de seis protozoarios encontraron en los primates del PZBJ: (A) Ooquiste de ***Cystoisospora spp***, (B) Quiste de ***Balantidium spp***, (C) Ooquiste de ***Sarcocystis spp***, (D) Quiste de ***Entamoeba histolytica/dispar***, (E) Quistes de ***Entamoeba coli***, (F) Ooquiste de ***Eimeria spp***. Fuente: Elaboración propia.

También se determinó la presencia de monoparasitismo en 20 casos (33.90%), siendo ***Entamoeba histolytica/dispar*** (11/59) el parásito de mayor presencia, seguido de ***Balantidium spp*** (4/59), ***Trichomonas spp*** (3/59) y ***Entamoeba coli*** (2/59). Presentándose parasitosis mixtas como biparasitismo en 7 casos (11.86%) siendo ***Entamoeba histolytica/dispar + Entamoeba coli*** (3/59) el parasitismo con mayor incidencia, ***Entamoeba coli + Balantidium spp*** (2/59), ***Entamoeba histolytica/dispar + Balantidium spp*** (1/59) y ***Entamoeba coli + Trichomonas spp*** (1/59), triparasitismo con 6 casos (10.17%) siendo una mayor presencia ***Entamoeba histolytica/dispar +***

Entamoeba coli* + *Balantidium spp (3/59), ***Entamoeba coli* + *Cystoisospora spp* + *Balantidium spp*** (1/59), ***Entamoeba coli* + *Entamoeba histolytica/dispar* + *Sarcocystis spp*** (1/59), ***Balantidium spp* + *Trichomonas spp* + *Entamoeba histolytica/dispar*** (1/59), y como un solo caso de tetraparasitismo (1.69%) presentado ***Eimeria spp* + *Cystoisospora spp* + *Entamoeba histolytica/dispar* + *Trichomonas spp*** en la especie ***Sapajus robustus***. (Tabla 4 y figura 8-9)

Figura 8. Porcentual de monoparasitismo y parasitosis mixtas presentes en los primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.



GÉNEROS DE PROTOZOARIOS	N°/casos positivos (59)	%
MONOPARASITISMO		
Balantidium spp	4	6.78
Entamoeba histolytica/dispar	11	18.64
Entamoeba coli	2	3.39
Eimeria spp	0	0
Cystoisospora spp	0	0
Sarcocystis spp	0	0
Trichomonas spp	3	5.08
BIPARASITISMO		
Entamoeba histolytica/dispar + *Balantidium spp*	1	1.69
Entamoeba histolytica/dispar + *Entamoeba coli*	3	5.08
Entamoeba coli + *Balantidium spp*	2	3.39
Entamoeba coli + *Trichomonas spp*	1	1.69
TRIPARASITISMO		
Entamoeba histolytica/dispar + *Entamoeba coli* + *Balantidium spp*	3	5.08
Entamoeba coli + *Cystoisospora spp* + *Balantidium spp*	1	1.69
Entamoeba coli + *Entamoeba histolytica/dispar* + *Sarcocystis spp*	1	1.69
Balantidium spp + *Trichomonas spp* + *Entamoeba histolytica/dispar*	1	1.69
TETRAPARASITISMO		
Eimeria spp + *Cystoisospora spp* + *Entamoeba histolytica/dispar* + *Trichomonas spp*	1	1.69

Tabla 4. Géneros de protozoarios de monoparasitismo, biparasitismo, triparasitismo y tetraparasitismo, así como los casos y el porciento de estos presentes en los primates de PZBJ.

Cabe recalcar que tres géneros de protozoarios gastrointestinales (***Eimeria spp***, ***Cystoisospora spp*** y ***Sarcocystis spp***) no se presentaron en ningún caso como monoparasitismo, solo fue con la presencia de algún otro género de protozoarios.

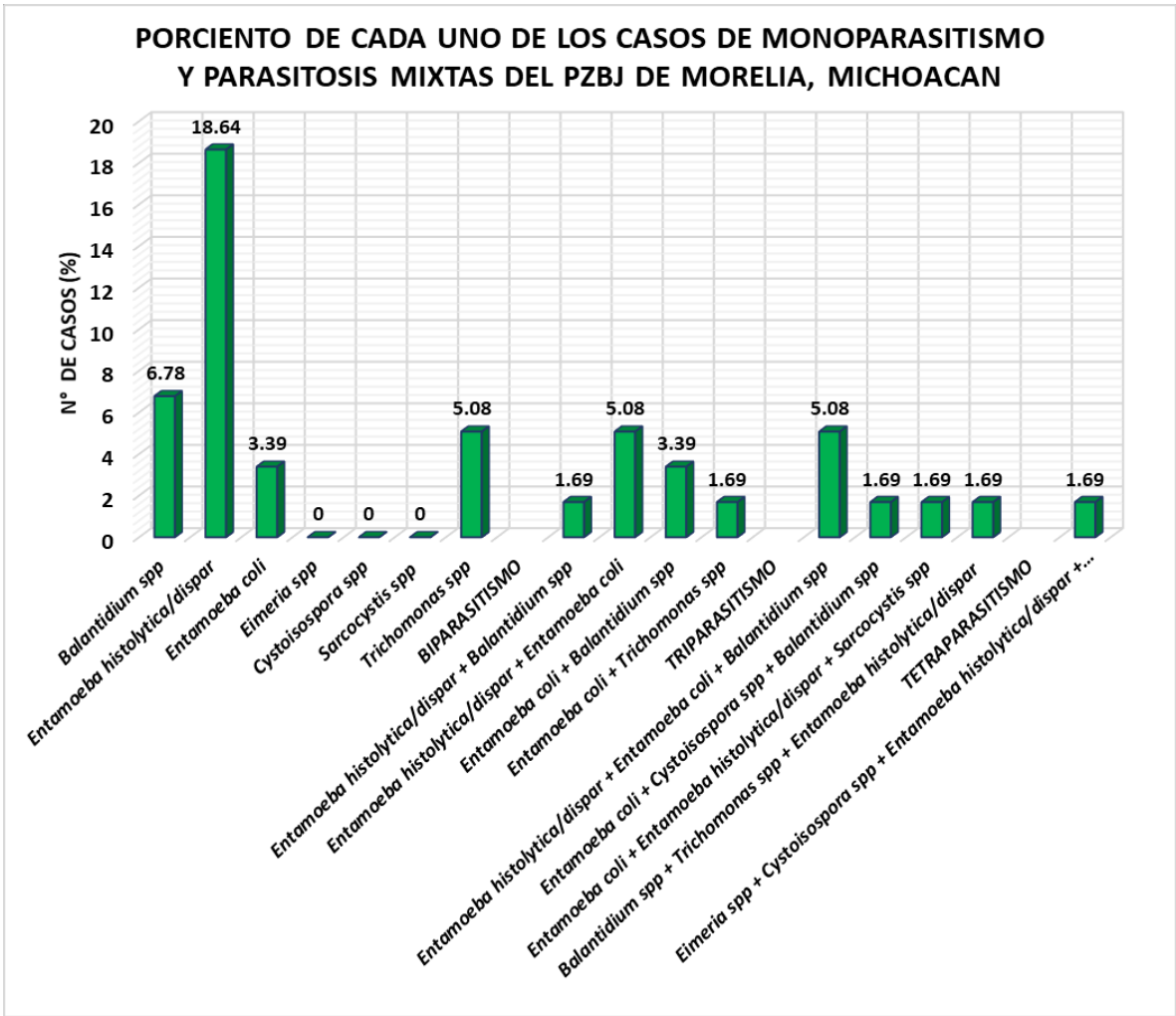


Figura 9. Porcentaje de cada uno de los casos de monoparasitismo, biparasitismo, triparasitismo y tetraparasitismo de protozoarios presentes en los primates del PZBJ de Morelia, Michoacán.

CONCLUSIONES

En este estudio se observó una alta incidencia parasitaria por protozoarios (57.63%), en donde se encontraron 7 especies de parásitos como *Entamoeba histolytica/dispar* (35.59%), *Entamoeba coli* (22.03%), *Balantidium spp*. (20.34%), *Trichomonas spp.* (10.17%), *Cystoisospora spp*. (3.39%), *Eimeria spp*. (1.69%) y *Sarcocystis spp*. (1.69%).

Determinando que las amebiasis se presentan mayormente con *Entamoeba histolytica/dispar* y *Entamoeba coli* seguida de protozoarios ciliados y flagelados, y con una baja incidencia de coccidios intestinales.

Este estudio nos describe la población de parásitos protozoarios existentes en primates bajo cuidado profesional, adaptándonos los elementos necesarios para un programa de desparasitación, lo cual debe tomarse en cuenta en los programas de conservación y reintroducción de estas especies.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. I. Ordoñez, “Determinación de helmintos gastrointestinales en primates no humanos del parque Zoológico Nacional la Aurora Guatemala, Guatemala”, Tesis de licenciatura, Univ. San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2012, pp. 77.
2. D. Botero, “Parasitosis humanas”, 5ª ed. Medellín, Colombia: Corporación para Investigaciones Biológicas, 2012, pp. 735.
3. D. D. Bowman, “Georgis parasitología para veterinarios”, 9ª ed. Barcelona, España: ELSEVIER, 2011, pp. 453.
4. F. Gual, “Determinación de parásitos gastrointestinales en primates del zoológico de Chapultepec” Tesis de licenciatura, Univ. Nacional Autónoma de México, México D.F., 1990, pp. 20.
5. F. Guerrero, *et al.*, “Identificación de parásitos gastrointestinales en primates no humanos del zoológico parque natural de Pucallpa, Perú”, *Rev. Inv. Vet. Perú*, Vol. 23, no. 4, 2012, pp. 469–476.
6. J. I. Zapata-Valencia *et al.*, “Frecuencia de enteroparásitos en primates Cebidae y Callitrichidae del Zoológico de Cali, Colombia: implicaciones zoonóticas”, *Rev. Biomédica*, Vol. 41, Supl. 1, 2021, pp. 60–81. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.7705/biomedica.5403.
7. J. Tay *et al.*, “Parasitología médica”, 8ª ed. México, D.F.: Méndez Editores, 2010, pp. 510.
8. L. F. Beltrán-Saavedra, P. M. Beldomenico y J. L. Gonzales, “Estudio coproparasitológico de mamíferos silvestres en cautiverio con destino a relocación en Santa Cruz, Bolivia,” *Rev. Veterinaria Zootecnia*, Vol. 3, no. 1, 2009, pp. 51–60. [En línea]. Disponible en: https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/5715.
9. N. G. Saredi, “Manual Práctico de Parasitología Médica”, 1ª ed. Buenos Aires, Argentina: Laboratorios Andrómaco, 2002, pp. 112.
10. N. Roncancio-Duque and J. A. Benavides, “Parásitos intestinales en poblaciones pequeñas y aisladas de Mono aullador rojo (Alouatta seniculus) y Mono araña café (Ateles hybridus), Atelidae – Primates en el Magdalena Medio, Colombia”, *Rev. Veterinaria Zootecnia*, Vol. 7, no. 1, 2013, pp. 71–89. [En línea]. Disponible en: https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/vetzootec/article/view/4406.
11. R. N. Solórzano, “Determinación de parásitos gastrointestinales en primates del zoológico Arenillas el oro”, Tesis de licenciatura, Univ. Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, 2023, pp. 80.

UTILIZACIÓN DE HARINA DE TAPIOCA PARA LA ELABORACIÓN DE UN PAN LIBRE DE GLUTEN

Lilian Daniela Merlos Parodi[1], Hugo David Peña Hernández[2], Esther Ramírez Moreno[3], Diana Carolina Moreno Ochoa[4], Vania Karyme Mayorga Ortega[5]

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
lilianmerlos01@gmail.com, Pe414883@uaeh.edu.mx

RESUMEN

El pan blanco en la dieta mexicana, tiene un alto IG debido a su harina refinada, por lo que eleva la glucosa (1). Para las personas con celiaquía, que necesitan opciones sin gluten, el pan de harina de tapioca se presenta como una alternativa. El objetivo fue elaborar un pan sin gluten con bajo índice glicémico (IG) utilizando harina de tapioca para incrementar el contenido de fibra y mejorar su textura. Se mezcló 250 g harina de tapioca, un huevo, 150 g queso fresco, 5 g de sal, 5 mL de aceite, 50 g de granos de granada y 5 g de leudante. La mezcla se homogenizó, premoldeó y horneó (180°C/35-45 min). Se realizó una prueba hedónica del pan para evaluar color, apariencia, texturas, aroma y sabor. La composición nutrimental se determinó de manera teórica utilizando el SMAE (2). Se determinó el IG del pan de tapioca en una población joven (edad 20-22 años) utilizando pan blanco como control. Este parámetro se consideró el valor del minuto 60, que fue el valor más alto en glucosa y se divide entre el valor de referencia del pan blanco al mismo tiempo. El pan fué aceptado por 70-85 % de los evaluadores, por el aroma, sabor y textura. Para la apariencia y color tuvo menor aceptación ya que carece, posiblemente porque no presentan aditivo de color, ya que está diseñado para el acompañamiento de alimentos como el pan blanco. El pan de tapioca presentó una mejor composición nutricional en comparación con el pan blanco comercial, ya que el pan de tapioca tiene una menor concentración de carbohidratos totales (44.30 g vs 47.5 g) por el bajo aporte de azúcares, grasas totales (2.52 vs 2.4 g) por lo tanto un menor aporte de kilocalorías hasta de un 40 % en comparación con el pan blanco. Además de un bajo contenido de sodio (80.03 vs 470 mg). Por lo que el pan de tapioca presentó un pico menor de IG (97.03) en comparación con el pan blanco (100), lo cual estuvo de acuerdo con Martins et al. (2021). El pan de tapioca presenta buenas características sensoriales y nutricionales para ser consumido en personas con celiaquía.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las necesidades alimentarias de la población han cambiado considerablemente, y cada vez más personas buscan alternativas saludables que se adapten a sus condiciones específicas de salud. Una de estas condiciones es la **celiaquía**, una enfermedad autoinmune que afecta a personas que no pueden consumir gluten, una proteína presente en cereales como el trigo, la cebada y el centeno. En este contexto, la búsqueda de **opciones de panificación sin gluten** se ha convertido en una prioridad para muchos consumidores y productores. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un **pan sin gluten utilizando harina de tapioca**, un ingrediente alternativo que permite mantener una textura agradable y un perfil nutricional adecuado, al tiempo que se ofrece una alternativa segura para quienes padecen celiaquía.

El **pan blanco tradicional**, ampliamente consumido en México, es conocido por su sabor y su versatilidad en la dieta diaria; sin embargo, presenta un **alto índice glicémico (IG)** debido al uso de **harinas refinadas**. El consumo excesivo de este tipo de productos puede elevar los niveles de glucosa en sangre y aumentar el riesgo de enfermedades como la diabetes tipo 2. Por ello, es fundamental buscar opciones que no solo sean seguras para las personas con intolerancia al gluten, sino también más saludables para la población en general.

TEORÍA

La harina de tapioca, obtenida a partir de la raíz de la yuca o mandioca, es un ingrediente ampliamente utilizado en diversas culturas gastronómicas, especialmente en América Latina y Asia. Su uso en panificación resulta particularmente interesante porque es un almidón naturalmente libre de gluten, lo que lo convierte en una excelente alternativa para elaborar productos aptos para personas con celiaquía. Además, la tapioca es rica en carbohidratos complejos, proporciona una textura suave y esponjosa, y tiene la capacidad de absorber líquidos, lo que ayuda a mejorar la humedad de los productos horneados.

PARTE EXPERIMENTAL

En la elaboración del pan libre de gluten, se utilizó una fórmula sencilla que consistió en 250 gramos de harina de tapioca, un huevo, 150 gramos de queso fresco, 5 gramos de sal, 5 mililitros de aceite, 50 gramos de granos de granada y 5 gramos de leudante. La preparación comenzó con la homogenización de los ingredientes, lo que permitió obtener una masa uniforme y fácil de trabajar. Posteriormente, se procedió al premoldeado de la masa y se horneó a 180°C durante un tiempo estimado de 35 a 45 minutos. Este proceso permitió obtener un producto final con una textura adecuada, aunque con algunas limitaciones en cuanto a su apariencia y color.

Para evaluar la aceptación del producto, se realizó una prueba hedónica en la que participaron jóvenes de entre 20 y 22 años, quienes valoraron aspectos como el color, la apariencia, la textura, el aroma y el sabor del pan. Los resultados fueron positivos, ya que el 70% al 85% de los evaluadores consideraron aceptables las características de aroma, sabor y textura. Sin embargo, la apariencia y el color obtuvieron menor aceptación, probablemente debido a la falta de aditivos de color en la receta, lo que generó un aspecto menos atractivo que el pan blanco comercial. A pesar de esto, el objetivo principal del pan —ser una opción saludable y segura para personas con celiaquía— se cumplió satisfactoriamente.

RESULTADOS

Uno de los aspectos más importantes de este estudio fue la evaluación de la composición nutricional del pan elaborado con harina de tapioca. Utilizando el SMAE (Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes), se encontró que este pan presenta un menor contenido de carbohidratos totales (44.30 g) en comparación con el pan blanco comercial (47.5 g). Además, el contenido de grasas totales es ligeramente menor (2.52 g vs. 2.4 g), lo cual contribuye a un menor aporte calórico general, con una reducción de hasta el 40% en comparación con el pan blanco tradicional.

Otro dato relevante es el contenido de sodio, que en el pan de tapioca es de 80.03 mg, considerablemente más bajo que en el pan blanco comercial, que tiene 470 mg. Esta diferencia es significativa, ya que un consumo elevado de sodio puede estar relacionado con problemas de salud como la hipertensión.
En cuanto al índice glicémico, se realizó una evaluación en una población joven, utilizando el pan blanco como referencia. El pico máximo de glucosa se tomó en el minuto 60 tras el consumo del pan, lo que permitió calcular el IG del producto de tapioca, obteniéndose un valor de 97.03, ligeramente menor que el del pan blanco (100). Esta diferencia puede parecer pequeña, pero es relevante al considerar que una dieta con alimentos de menor IG puede ayudar a controlar mejor los niveles de glucosa en sangre, especialmente en personas con diabetes o resistencia a la insulina.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Martins et al. (2021), quienes señalaron que los productos elaborados con harina de tapioca pueden tener un menor impacto en el índice glicémico en comparación con los productos tradicionales que contienen gluten.

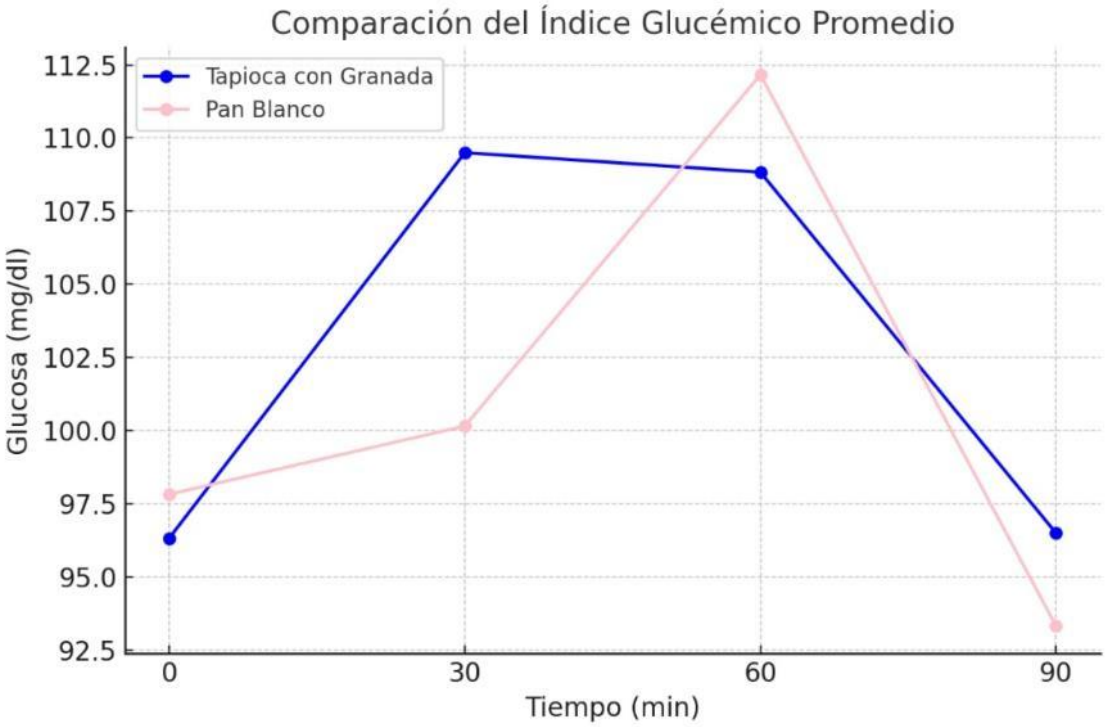


Figura 1. Comparación de índice glucémico.

CONCLUSIONES

El pan elaborado con harina de tapioca se presenta como una alternativa innovadora y saludable para las personas con celiaquía o para aquellos que desean reducir su consumo de gluten y mejorar su alimentación. Aunque presenta algunas limitaciones en cuanto a su apariencia y color, el pan destaca por sus buenas características sensoriales, su aceptable sabor y aroma, su textura adecuada, y sobre todo por su mejor perfil nutricional y su menor índice glicémico en comparación con el pan blanco tradicional.

Este estudio demuestra que es posible desarrollar productos de panificación sin gluten que sean agradables al paladar, seguros para el consumo, y que además ofrezcan beneficios nutricionales adicionales. La harina de tapioca, al ser un ingrediente natural, versátil y de fácil acceso, se convierte en un recurso valioso para la industria alimentaria, especialmente en la búsqueda de opciones inclusivas para personas con intolerancia al gluten.

Finalmente, se recomienda continuar explorando nuevas formulaciones, combinaciones de ingredientes y técnicas de horneado para mejorar aún más la apariencia, textura y calidad nutricional de este tipo de productos. Asimismo, es importante promover la educación nutricional para que más personas conozcan las ventajas de consumir alimentos sin gluten, no solo por necesidad médica, sino como parte de una alimentación variada, saludable y balanceada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Vega Soto, C., Pérez-Bravo, F., & Mariotti-Celis, M. S. (2023). Cantidad, estabilidad y digestibilidad de hidratos de carbono tras el proceso de extrusión: Impacto sobre el índice glicémico de harinas de consumo habitual en Chile. Revista chilena de nutrición, 50(2), 233-241.

2. SMAE. (2015). Retrieved October 25, 2024, from Midietasmae.com.mx website: https://midietasmae.com.mx/
3. Martins, A. M., Rocha, C., & Silva, A. (2021). Evaluación de las características nutricionales y sensoriales de productos a base de tapioca para dietas sin gluten. Journal of Gluten-Free Products, 15(3), 102-115.

APROVECHAMIENTO DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA EN LA PRODUCCIÓN DE VERMICOMPOSTA Y SUSTRATOS COMO ALTERNATIVA EN LA GERMINACIÓN DE *Cucumis Sativus* (PEPINO) Y *Lens Culinaris* (LENTEJA)

Joel De Jesús Barba Franco[1 y 2], Fernando Guadalupe Aviña González[2], Brayan Ruvalcaba Sánchez[2], Samuel Iñiguez Gómez[2], Ofelia Iñiguez Gómez[3] y Brenda Mata Ortega[1]

[1]Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Lagos, [2]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas, Avenida José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México. [3]Centro Universitario de los Altos, Universidad de Guadalajara,
jbarba151292@gmail.com

RESUMEN

La industria tequilera en México genera grandes cantidades de residuos, entre ellos el bagazo de agave, que alcanza aproximadamente 757 mil toneladas anuales. Este subproducto, rico en celulosa y lignina, presenta un desafío ambiental debido a su lenta degradación y su acumulación descontrolada, lo que puede provocar contaminación del suelo, emisión de gases de efecto invernadero y proliferación de plagas. Sin embargo, el bagazo de agave tiene un alto potencial para su aprovechamiento en la producción de vermicomposta y sustratos agrícolas, ofreciendo una alternativa sustentable ante la degradación del suelo y el uso excesivo de fertilizantes químicos en la agricultura. En este estudio, se obtuvo bagazo de *Agave tequilana* de una tequilera local en Arandas, Jalisco, y se mezcló con estiércol bovino en una proporción 7:3 (estiércol:bagazo). Tras una fase de precompostaje, se incorporaron lombrices californianas (*Eisenia fetida*) y se establecieron dos tratamientos: uno humedecido con agua (VA) y otro con vinaza (VV). Luego de dos meses, la vermicomposta obtenida fue molida y caracterizada en términos de densidad real y aparente, porosidad, pH (1:10), color, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de cenizas (minerales) y capacidad de campo. Finalmente, se evaluó el efecto del bagazo (B) de agave y la vermicomposta en la germinación de *Cucumis sativus* (pepino) y *Lens culinaris* (lenteja), explorando su viabilidad como sustrato agrícola alternativo.

Los resultados de este estudio contribuyen al desarrollo de estrategias sostenibles para la valorización de residuos agroindustriales y su aplicación en la agricultura. La caracterización de los sustratos mostró diferencias significativas en color, densidad y porosidad. El bagazo presentó un tono marrón claro, mientras que VA fue gris oscuro y VV negro, sugiriendo una mayor degradación en presencia de vinaza. El bagazo tuvo la menor densidad aparente (0.19 ± 0.00 g/cm³) y real (0.66 ± 0.05 g/cm³), con la mayor porosidad (71.23 ± 2.61%). En contraste, VA y VV mostraron densidades aparentes similares (0.70 ± 0.01 g/cm³ y 0.67 ± 0.01 g/cm³ respectivamente), pero VV presentó menor densidad real (1.28 ± 0.11 g/cm³) comparado con 1.70 ± 0.31 g/cm³ en VA, indicando una estructura más porosa. La porosidad en VA y VV varió entre 47-60%, y la materia orgánica se mantuvo en 47-50%, reflejando la influencia de la relación estiércol:bagazo. Estos resultados sugieren que la vermicompostaje del bagazo mejora sus propiedades físicas, con variaciones según el tipo de humectación, lo que puede influir en su desempeño como sustrato agrícola. Por último, los sustratos fueron evaluados en la germinación de pepino y lenteja. La lenteja mostró la mejor respuesta, con una germinación del 90% en bagazo y 60% en VA. En el caso del pepino, la germinación fue del 75% en bagazo y del 40% en ambas vermicompostas. Estos resultados sugieren promisorio uso de bagazo para sustratos y vermicomposta, no obstante se requiere profundizar en el procesamiento de vermiconpostaje.

INTRODUCCIÓN

El tequila es reconocido como la bebida destilada más emblemática de México, reconocida globalmente por su calidad, tradición y valor cultural. Desde 1977, posee la Denominación de Origen, que garantiza que su producción se limita a ciertas regiones autorizadas del país, tales como Jalisco,

Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas. Esta denominación no solo protege el producto, sino que también refuerza su autenticidad y prestigio en el ámbito internacional. En la actualidad, el tequila se exporta a 148 países, consolidándose como un símbolo de la identidad nacional y una bebida de alta demanda a nivel global (CRT, 2025).

La producción de tequila utiliza exclusivamente el *Agave tequilana* Weber variedad azul como materia prima, del cual se extraen los azúcares necesarios para llevar a cabo los procesos de fermentación y destilación. No obstante, este proceso genera cantidades significativas de residuos orgánicos. Por cada litro de tequila producido, se generan entre 10 y 12 litros de vinaza y de 3.5 a 7 kilogramos de bagazo de agave. En 2024, la industria requirió 1.89 millones de toneladas de agave para elaborar 495.84 millones de litros de tequila, lo que resultó en la producción de aproximadamente 756 mil toneladas de bagazo como subproducto, cuyo manejo representa un desafío ambiental considerable (CRT, 2025; Salcedo-Pérez & Ordaz-Chaparro, 2024).

Por otro lado, el sustrato de germinación se define como el medio en el que se siembran las semillas para facilitar su brote y crecimiento inicial. Este debe ser poroso, capaz de retener humedad, permitir una adecuada aireación y estar libre de patógenos. Puede estar compuesto por materiales orgánicos como turba, composta o bagazo de agave (Raviv & Lieth, 2008). Además, la vermicomposta es un abono orgánico producido por lombrices que descomponen residuos orgánicos. Gracias a su alta concentración de nutrientes y microorganismos beneficiosos, es ideal para mejorar la calidad del sustrato de germinación. Su aplicación en la siembra favorece el crecimiento de las plántulas al mejorar la estructura del suelo, aumentar la retención de agua y promover un ambiente saludable para las raíces (Edwards & Arancon, 2004).

Frente a esta problemática, una alternativa sostenible y de gran relevancia para la agricultura es el aprovechamiento del bagazo de agave como sustrato de germinación en viveros. El bagazo presenta características físicas y químicas que lo hacen adecuado para este propósito: contiene una alta cantidad de materia orgánica, fibras que mejoran la aireación, una buena capacidad de retención de agua y una textura apropiada para favorecer el crecimiento radicular. Su utilización puede disminuir la dependencia de otros sustratos importados, como la turba de musgo, cuyo proceso de extracción es ambientalmente costoso, o el polvo de coco, que también presenta limitaciones logísticas y económicas.

De ahí que, la utilización de residuos agroindustriales, como el bagazo, se inscribe dentro de los principios de la economía circular, que busca cerrar los ciclos productivos y añadir valor a los subproductos generados. Esta estrategia no solo contribuye a la reducción de residuos y a mitigar su impacto ambiental, sino que también ofrece una oportunidad para disminuir los costos de producción en el ámbito agrícola.

En este marco, Crespo y colaboradores (2013) realizaron un estudio en el que analizaron el uso de composta de bagazo de agave como sustrato para la germinación, en comparación con la turba canadiense y el polvo de coco, que son comúnmente empleados en viveros comerciales. Los resultados obtenidos fueron alentadores: la composta de bagazo demostró un rendimiento igual o superior en términos de emergencia y desarrollo de plántulas de agave azul, lo que respalda su viabilidad como una alternativa local y sostenible.

Motivados por estos hallazgos, este estudio tuvo como objetivo evaluar el aprovechamiento del bagazo de agave como sustrato de germinación para dos especies de interés agrícola: pepino (*Cucumis sativus*) y lenteja (*Lens culinaris*), debido a su importancia en la dieta y su cultivo en diferentes regiones del país. Se planteó la hipótesis de que el bagazo, solo o en mezcla con estiércol de bovino, podría ofrecer un medio de germinación adecuado en términos de emergencia, vigor y desarrollo inicial de las plántulas. Esta evaluación permitirá generar conocimiento útil para promover el uso de residuos agroindustriales como insumos agrícolas de valor, reforzando la sostenibilidad del sector.

TEORÍA

Los sustratos de germinación son materiales sólidos distintos al suelo, utilizados como soporte físico en la etapa inicial del desarrollo radicular de las plantas. Estos pueden ser de origen mineral, como perlita, vermiculita o arena, o de origen orgánico, como la turba, composta, fibra de coco o residuos agroindustriales como el bagazo de agave. Suelen colocarse en contenedores como semilleros, y su formulación ha evolucionado con el objetivo de mejorar la producción y calidad de las plántulas. Esto se debe a que las plantas jóvenes en buen estado fisiológico se ajustan con mayor rapidez al suelo definitivo, experimentan menos estrés durante el trasplante y muestran un desarrollo más uniforme y vigoroso a lo largo de su ciclo productivo (Caballero-Salinas y colaboradores, 2020).

Para que un sustrato de germinación sea considerado adecuado, debe reunir ciertas características físicas, químicas y biológicas que favorezcan la emergencia de las semillas y el crecimiento inicial de las raíces. Entre los parámetros más importantes se encuentran, porosidad total del 70 al 85%, que permite un adecuado equilibrio entre aireación y retención de agua; una capacidad de retención de humedad de entre 40 y 60%, que garantiza la disponibilidad de agua sin saturar el sistema radicular; y una densidad aparente baja, entre 0.1 y 0.3 g/cm³, que facilita el desarrollo de raíces finas y evita la compactación del sustrato (Puerta y colaboradores, 2012). El pH debe mantenerse en un rango ligeramente ácido a neutro, idealmente entre 5.5 y 6.5, y la conductividad eléctrica (CE) no debe superar 1.0 a 1.5 dS/m para evitar daños por exceso de sales solubles (Barba-Franco, 2022). Además, el sustrato debe estar libre de patógenos, semillas de malezas y compuestos fitotóxicos.

Los sustratos utilizados para la germinación y en algunos casos para el posterior crecimiento de las plántulas tiene como función la retención de agua adecuada, ya que un exceso o disminución pueden deteriorar las plantas, además de otorgar una alta capacidad de aireación (Oliveira colaboradores, 2015), proporcionar soporte físico para el enraizamiento y se mantenga erguida la planta, dotar de oxígeno y nutrientes para mantener el equilibrio metabólico y la fisiología vegetal (Téllez-Pérez y colaboradores, 2018). Por lo tanto, la selección adecuada de estos materiales es crucial para garantizar una tasa alta de germinación y un crecimiento saludable de los cultivos.
Por otro lado, la vermicomposta es un abono orgánico producido mediante la acción de lombrices, las cuales aceleran la descomposición de residuos orgánicos a través de procesos de mineralización y humificación. Esto da como resultado un material estable, rico en nutrientes, que puede ser utilizado como fuente natural de fertilidad para los cultivos, promoviendo un crecimiento vegetal saludable (Vázquez & Loli, 2018).

Este tipo de enmienda destaca por su elevada capacidad de retención de agua, alta actividad microbiana y concentración equilibrada de nutrientes. Además, mejora significativamente las propiedades físicas del suelo, como la aireación, la porosidad y la estructura, así como sus características químicas, incluyendo el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica. La vermicomposta también es una fuente sostenible de macro y micronutrientes, y contiene microorganismos benéficos como bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, además de hormonas vegetales, vitaminas, ácidos húmicos y enzimas que favorecen el desarrollo de las plantas. Gracias a estas cualidades, no solo contribuye a mejorar el rendimiento de los cultivos, sino que también promueve la conservación del agua y la fertilidad del suelo, posicionándose como una solución eficaz para una agricultura más sostenible (Yatoo y colaboradores, 2021).

VINAZA

Los residuos conocidos como vinazas son el subproducto principal que resulta de la producción de etanol y licores mediante destilación a nivel global, y se producen en grandes cantidades. Las vinazas tequileras son generadas al concluir el proceso de fermentación, el jugo fermentado, conocido como “mosto”, se lleva a un destilador para someterlo a dos destilaciones consecutivas y producir tequila; después de la última destilación, queda un líquido residual llamado vinazas, las cuales son aguas residuales que presentan una elevada concentración de materia orgánica, con una demanda química de oxigeno (DBO) mayor a 38.21 g/L, sólidos totales (ST) por encima de 21.88 g/L

y poseen un pH bajo entre 3.5 y 3.9; son efluentes desechados a temperaturas cercanas a los 90 °C, por lo cual son consideradas un contaminante térmico (Íñiguez & Hernández, 2010); también cuentan con valores altos en la conductividad, altas concentraciones de compuestos como grasas y aceites; además de elementos como calcio, magnesio y potasio (Zurita y colaboradores, 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

Los residuos utilizados en este estudio, específicamente el bagazo y las vinazas, fueron proporcionados por la empresa Tequila Trujillo.

Preparación de la vermicomposta

Se preparó una mezcla de estiércol bovino y bagazo de agave en una proporción 7:3 (estiércol:bagazo). Luego de una fase de precompostaje de un mes, se incorporaron lombrices californianas (*Eisenia fetida*) para iniciar el proceso de vermicompostaje. Se establecieron dos tratamientos: uno humedecido con agua (VA) y otro con vinaza (VV). Después de dos meses, la vermicomposta obtenida se dejó secar al sol, se molió y se almacenó hasta su caracterización y posterior uso en los experimentos de germinación.

Uso de vermicomposta en germinación de lenteja y pepino

Se evaluó el efecto del bagazo de agave (B) y la vermicomposta en la germinación de *Cucumis sativus* (pepino) y *Lens culinaris* (lenteja), con el objetivo de explorar su viabilidad como sustratos agrícolas alternativos. Se sembraron dos semillas por pocillo en un semillero con 10 pocillos por tratamiento. Los experimentos se realizaron por triplicado y, durante un periodo de siete días, se registró diariamente el número de brotes observados en cada pocillo para evaluar la tasa de germinación.

Caracterización de los sustratos

Se caracterizó la densidad real y aparente, porosidad, pH (1:10), color, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de cenizas (minerales) y capacidad de campo.

Determinación de pH

La determinación del pH de cada uno de los sustratos se llevó a cabo utilizando un pHmetro (marca), siguiendo la metodología establecida por Beretta y colaboradores (2014). Se pesó 1 g de sustrato seco en un tubo Falcon de 50 mL, al cual se le añadieron 20 mL de agua destilada. Posteriormente, los tubos fueron sometidos a agitación orbital durante 10 minutos a una velocidad de 50 rpm y con un ángulo de inclinación de 15°. Finalmente, se permitió que los tubos reposaran durante 30 minutos, tras lo cual se procedió a medir el pH del sobrenadante a una temperatura de 25 °C.

Determinación de conductividad eléctrica

Se pesaron 1 g de sustrato, el cual había sido previamente deshidratado en estufa, y se colocaron en tubos Falcon de 50 mL. A estos tubos se les adicionaron 20 mL de agua destilada. Posteriormente, se agitaron durante 10 minutos y se dejaron reposar durante 30 minutos y al finalizar este tiempo, se procedió a medir la conductividad utilizando el conductímetro.

Determinación de la densidad real y aparente

La densidad relativa de los sustratos se determinó siguiendo el método descrito por Andrades y colaboradores (2015), el cual se detalla a continuación. Las muestras de sustrato fueron secadas en estufa a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente, se llenó completamente un cilindro de volumen y peso conocidos con cada muestra seca, y se registró la masa correspondiente. La densidad aparente se calculó utilizando la siguiente ecuación 1:

$$\rho_a = \frac{M_{sustrato} - M_{cilindro}}{V_{cilindro}} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde:
$M_{sustrato}$: peso de cilindro lleno de sustrato
$M_{cilindro}$: peso de cilindro vacío
$V_{cilindro}$: volumen total del cilindro

El procedimiento de repitió 5 veces reportándose la media de los pesajes ± la desviación estándar (SD).

Ademas, la densidad se define como la relación entre la masa de un material y su volumen (Hewitt, 1999). Para determinar la densidad real de los sustratos, se utilizó un picnómetro de 30 mL, instrumento de volumen fijo que permite medir con precisión la densidad de sólidos y líquidos (Ohanian & Markert, 2009).

El procedimiento consistió en pesar el picnómetro lleno con agua destilada (Pa), luego se introdujeron 2 g de la muestra de sustrato, eliminando el exceso de agua, y se registró nuevamente el peso (Pm). Se realizaron cinco mediciones por cada tipo de sustrato, y la densidad real se calculó con la ecuación 2.

$$\boldsymbol{\rho_r = \frac{2\,g}{(P_a + 2) - P_m}} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Determinación de porosidad
La porosidad total del sustrato se calculó de forma indirecta de acuerdo a López-López y colaboradores (2018), que a partir de la relación entre la densidad aparente (ρ_a) y la densidad real (ρ_r). Y se calculó utilizando la siguiente ecuación 3:

$$\boldsymbol{porosidad = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100} \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

Determinación de materia orgánica y minerales (cenizas)
La determinación de la materia orgánica en los sustratos se realizó por método gravimétrico, siguiendo la metodología de Andrades y colaboradores (2015). Los crisoles se llevaron a peso constante (m_0) en una mufla (marca) a 400 °C durante 2 horas. Luego, se colocaron 10 g de cada muestra (previamente secadas a 105 °C) en los crisoles y se registró su peso (m_1). Las muestras fueron calcinadas en la mufla, incrementando la temperatura en intervalos de 100 °C cada 15 minutos hasta alcanzar los 400 °C, temperatura que se mantuvo por 16 horas. Finalmente, los crisoles se enfriaron a temperatura ambiente y se pesaron nuevamente (m_2). Se calculó la cantidad de materia orgánica (MO) en los sustratos, utilizado la ecuación 4:

$$\boldsymbol{\%MO = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}\right) * 100} \qquad \textbf{Ecuación 4}$$

Adicional mente, el porcentaje de minerales (%minerales) en cada uno de los sustratos se calculó mediante la ecuación 5:

$$\boldsymbol{\%minerales = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_0}\right) * 100} \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

Determinación de color se sustratos
Se tomó una muestra representativa de sustrato seco y otra húmeda. Las muestras se colocaron sobre una superficie blanca y se compararon visualmente, bajo luz natural difusa (evitando sombras directas o artificiales), con los cuadros de color de la carta Munsell Soil Color Charts. La coincidencia más cercana entre la muestra y la carta fue registrada en el formato estándar Munsell

Determinación de capacidad de campo
La capacidad de campo de los sustratos se determinó siguiendo un método gravimétrico basado en la saturación y posterior drenado del material. Para ello, se colocaron aproximadamente 100 g de

sustrato seco en recipientes plásticos perforados en la base, los cuales fueron sumergidos en agua durante 24 horas para garantizar la saturación completa del sustrato. Posteriormente, se retiraron y se dejaron escurrir libremente a temperatura ambiente durante 2 horas, permitiendo el drenaje del exceso de agua por gravedad (López-López y coloboradores., 2018).

Finalizado el tiempo de escurrimiento, se pesó el sustrato húmedo (m_h), y luego se secó en estufa a 105 °C durante 24 horas hasta peso constante para obtener la masa seca (m_s). La capacidad de campo se calculó con la siguiente ecuación:

$$\textbf{Capacidad de campo } (\%) = \left(\frac{\mathbf{m_h - m_s}}{\mathbf{m_s}}\right) * \mathbf{100} \qquad \textbf{Ecuación 6}$$

Análisis estadístico

Cada análisis se realizó por triplicado y los resultados se expresaron con la media estadística y su respectiva desviación estándar. Los datos obtenidos en cada prueba se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y la significancia de la diferencia de medias se determinaron mediante la prueba de Tukey ($p< 0.05$) usando un software estadístico Minitab versión 18.1.

RESULTADOS

La caracterización de los diferentes sustratos evaluados en este estudio se muestran en la tabla 1, se encontraron valores de pH superiores a los 7.1, esto nos hace concluir que son valores aun altos ya que generalmente se recomienda un rango de pH de entre 5.5 y 7.0 . Este rango favorece la disponibilidad de nutrientes para las plántulas en crecimiento y asegura un ambiente adecuado para la germinación (Noguera y colaboradores, 2003). Además, la porosidad total de un sustrato de germinación, que debe situarse entre el 60% y el 85%, es fundamental para asegurar un desarrollo óptimo de las plántulas. Este intervalo de porosidad garantiza un equilibrio adecuado entre el aire y el agua, lo que permite una circulación eficiente de oxígeno y una adecuada retención de humedad, favoreciendo así tanto la germinación como el crecimiento inicial de las plantas (Puerta y colaboradores, 2012). En este sentido, los sustratos de vermiconposta con agua y bagazo se encontraron dentro de los valores de porosidad esperados.

Adicionalmente se espera que los sustratos tengan una capacidad de campo de entre 40 y 60%, que garantiza la disponibilidad de agua sin saturar el sistema radicular; y una densidad aparente baja, entre 0.1 y 0.3 g/cm³, siendo el bagazo el único que se encontró dentro de los valores mencionados por Puerta y colaboradores (2012).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los sustratos utilizados en la germinación de pepino y lenteja.

Parámetro	Bagazo	Vemicomposta (agua)	Vemicomposta (vinaza)
pH	7.34 ± 0.00b	7.10 ± 0.01c	7.57 ± 0.01a
Densidad aparente (g/cm³)	0.19 ± 0.00b	0.70 ± 0.03a	0.67 ± 0.01a
Densidad real (g/cm³)	00.66 ± 0.05c	1.78 ± 0.31a	1.28 ± 0.14b
Porosidad (%)	71.23 ± 2.68a	60.04 ± 6.72b	47.21 ± 5.50c
Materia organica (%)	86.57 ± 3.14a	49.67 ± 4.15b	52.09 ± 2.02b
Cenizas (%)	13.43 ± 3.14b	50.33 ± 4.15a	47.91± 2.02a

En el cultivo de pepino, el tratamiento con bagazo generó la mayor tasa de germinación, alcanzando un 35%, lo cual fue significativamente superior al observado con los tratamientos de vermicomposta con agua y con vinaza ($p < 0.05$). Los tratamientos con vermicomposta en agua y vinaza no mostraron diferencias significativas entre sí, y ambos presentaron porcentajes de germinación más bajos (Figura 1). Esto indica que el bagazo favorece un ambiente más adecuado para la emergencia del pepino. Los valores más bajos con vinaza pueden estar relacionados con la presencia de compuestos inhibidores. Así, el uso de bagazo destaca como una estrategia beneficiosa en la etapa inicial del cultivo (Sharma y colaboradores, 2023).

Asimismo, el porcentaje de germinación de las semillas de pepino (Cucumis sativus L.) puede experimentar variaciones significativas en función de las condiciones ambientales y los tratamientos aplicados. En entornos óptimos de laboratorio, se han documentado tasas de germinación que superan el 95% en diferentes lotes de semillas, con una emergencia radicular completa en un lapso de 8 días (Demir et al., 2023), valores que unicamente fueron similares en el tratamiento de bagazo. Otros factores como el estrés por salinidad y las bajas temperaturas pueden afectar negativamente estas tasas de germinación. Por ejemplo, en condiciones de estrés combinado por sal y temperaturas reducidas, la emergencia de plántulas puede disminuir entre un 76% y un 92%. (Sharma y colaboradores, 2023).

Por otro lado, el tratamiento con bagazo promovió el mayor porcentaje de germinación en lenteja, superando 55% significativamente ($p<0.05$) a la vermicomposta de vinaza. El tratamiento con agua presentó una germinación intermedia, sin diferencias estadísticas marcadas con los otros tratamientos. La vinaza mostró el valor más bajo, indicando un posible efecto negativo o inhibitorio.

Este resultado puede atribuirse al aporte de compuestos orgánicos y porosidad ideal en bagazo, que mejoran la retención de humedad y la disponibilidad de gases esenciales durante la imbibición de la semilla y germinación. En contraste, el bajo porcentaje de germinación observado con vinaza puede deberse a su alto contenido de sales y compuestos fenólicos, los cuales pueden generar estrés osmótico o toxicidad (González y colaboradores, 2014). Además, la germinación depende de múltiples factores fisiológicos como la integridad del embrión, la permeabilidad de la testa y la disponibilidad de oxígeno (Bewley et al., 2013)

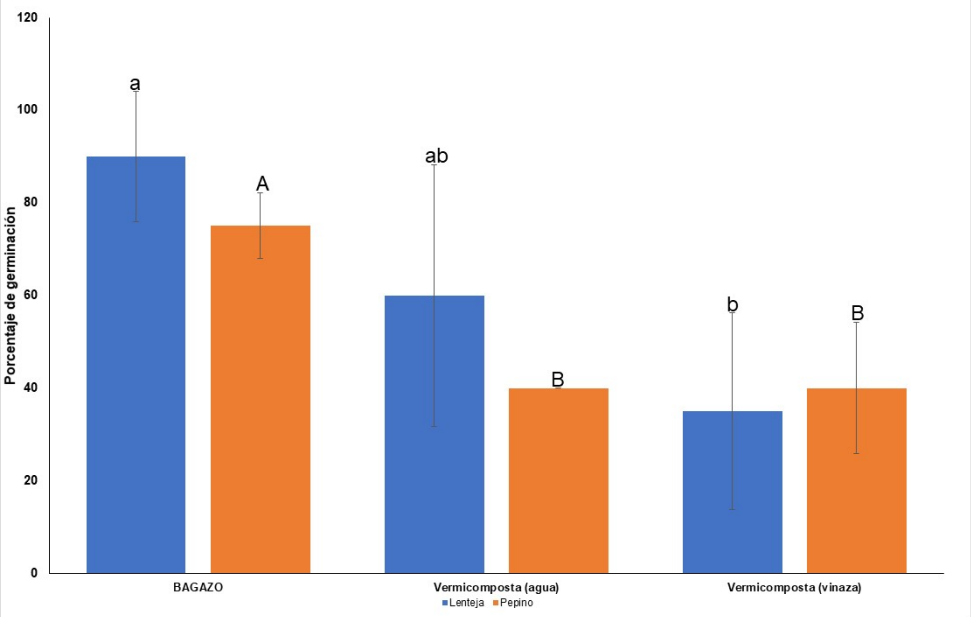


Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de lenteja y pepino en bagazo de agave y vermicomposta de agave remojada con agua y vinaza.

La medición de altura de las plántulas de lenteja y pepino se muestra en la figura 2, se evidencia que el tratamiento con bagazo favorece el crecimiento más significativo en lenteja, alcanzando aproximadamente 17.5 cm, lo cual es estadísticamente ($p<0.05$) superior a los demás tratamientos. En el caso del pepino, el bagazo también presenta un efecto positivo, logrando una altura cercana a 9.5 cm, aunque inferior a la observada en lenteja. El tratamiento con agua, resultó en un crecimiento limitado para ambas especies, siendo especialmente notoria esta limitación en pepino, que apenas alcanzó 2 cm, lo que sugiere una deficiencia de nutrientes esenciales. Por otro lado, la vinaza mostró un efecto interesante: no mejoró significativamente la altura de la lenteja, que fue comparable al tratamiento con agua, pero sí promovió el crecimiento del pepino, alcanzando alturas similares (9 cm) a las del tratamiento con bagazo. Esto sugiere que tanto el bagazo como la vinaza pueden funcionar para aporta al crecimiento temprano de plántulas.

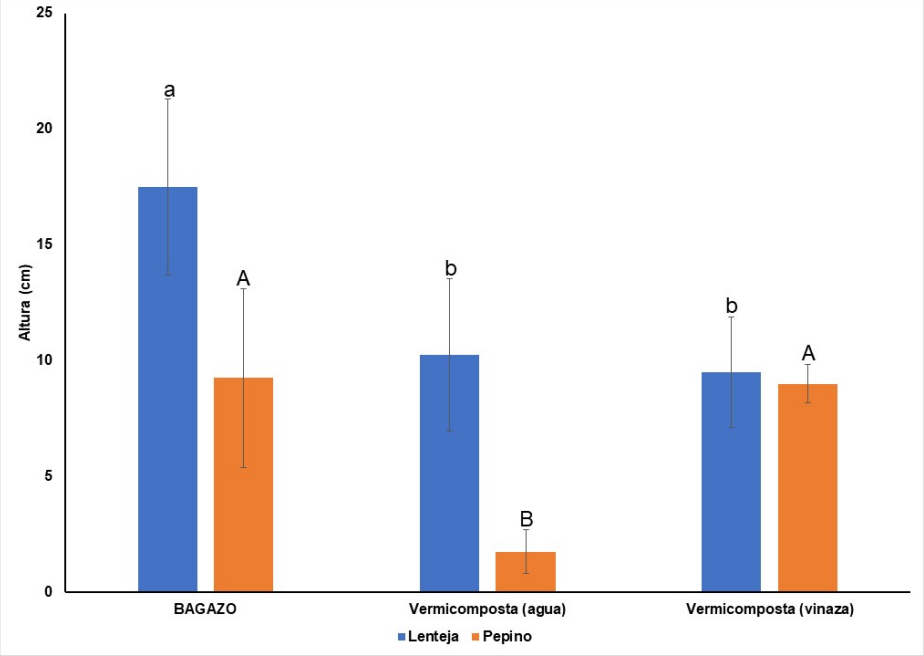


Figura 2. Mediciones de altura de los las plántulas de lenteja y pepino en bagazo de agave y vermicomposta de agave remojada con agua y vinaza.

CONCLUSIONES

La caracterización físico-química de los sustratos reveló que el bagazo de agave presenta propiedades favorables, tales como una baja densidad aparente y una alta porosidad, lo que lo convierte en un material adecuado para el desarrollo inicial del sistema radicular. Aunque el proceso de vermicompostaje mejoró ciertos atributos estructurales del sustrato, especialmente en el tratamiento con vinaza (VV), que mostró un mayor grado de degradación, los resultados de germinación fueron más efectivos en el bagazo sin transformar, destacándose la especie *Lens culinaris* (lenteja) con una tasa de germinación del 90%. Estos resultados sugieren que el bagazo de agave, incluso sin someterse a procesos de transformación adicionales, constituye una alternativa viable, sostenible y de bajo costo en comparación con los sustratos comerciales, además de contribuir a la mitigación del impacto ambiental asociado con la acumulación de residuos agroindustriales. No obstante, es fundamental profundizar en la optimización del proceso de vermicompostaje, así como en la evaluación de parámetros microbiológicos y nutricionales, con el objetivo de mejorar su eficacia como sustrato para diversos tipos de cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta Sotelo, L. L., Zamora Natera, J. F., Rodríguez Macías, R., González Eguiarte, D. R., Gallardo Lancho, J. F., Salcedo Pérez, E., … Salcedo Pérez, E. (2023). Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 1. Dinámica de degradación. Biotecnia, 25(2), 90–96. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i2.1801
2. Caballero Salinas, J. C., Ovando-Salinas, S. G., Núñez-Ramos, E., & Aguilar-Cruz, F. (2020). Sustratos alternativos para la producción de plántulas de tomate de cáscara (Physalis ixocarpa Brot.) en Chiapas. *Siembra*, *7*(2), 014–021. https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.1916
3. Crespo González, M. R., González Eguiarte, D. R., Rodríguez Macías, R., Ruiz Corral, J. A., & Durán Puga, N. (2018). Caracterización Química Y Física Del Bagazo De Agave Tequilero Compostado Con Biosólidos De Vinaza Como Componente De Sustratospara Cultivos En Contenedor. Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 34(3), 373–382. https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.0
4. Crespo, M., González, D., Macías, R., Rodríguez, A., Rendón, L., Del Real, I., & Pablo, J. T. M. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero* Evaluation of agave bagasse compost as a component of substrates to produce seedlings of blue agave. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4(8), 1161–1173. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n8/v4n8a4.pdf
5. CRT. (2025). Exportaciones por Destino. Retrieved April 21, 2025, from https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/
6. Delgadillo Ruíz, L., Bañuelos Valenzuela, R., León, E., Ibarra, E., Gutiérrez Bañuelos, H., Javier, F., … Reyes, A. M. (2015). Nutrient profile evaluation of agave bagasse as alternative feedstuffs for ruminants. Revista Mexicana de Ciencias Agricolas, 2099–2103.
7. Estrada Maya, A., & Weber, B. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. Ingeniería Investigación y Tecnología, 23(2), 1–10. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009
8. Íñiguez, G., & Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 26(4), 299–311.
9. Oliveira, A. K. M., Souza, S. A., Souza, J. S., & Carvalho, M. B. (2015). Temperature and substrate influences on seed germination and seedling formation in Callisthene fasciculata Mart. (vochysiaceae) in the laboratory. Revista Arvore, 39(3), 487–495. https://doi.org/10.1590/0100-67622015000300009
10. Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). Soilless culture: Theory and practice. Academic Press.
11. Rodríguez, G. (2007). La Denominación De Origen Del Tequila: Pugnas De Poder Y La Construccion De La Especificidad Sociocultural Del Agave Azul. Nueva Antropología.
12. Rodríguez-Félix, E., Contreras-Ramos, S. M., Davila-Vazquez, G., Rodríguez-Campos, J., & Marino-Marmolejo, E. N. (2018). Identification and quantification of volatile compounds found in vinasses from two different processes of Tequila production. Energies, 11(3), 12–15. https://doi.org/10.3390/en11030490
13. Salcedo-pérez, E., & Ordaz-chaparro, V. M. (2024). Propiedades físicas y químicas de sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino sometidos a explosión con vapor subjected to steam explosion, 1–10. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.2389
14. Téllez-Pérez, V., López-Olguín, J. F., Aragón, A., & Zayas-Pérez, M. T. (2018). Lodos Residuales De Nejayote Como Sustratos Para La Germinación De Semillas De Maíz Azul Criollo. Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 34(3), 395–404. https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.03
15. Valencia Sandoval, K., Rojas Rojas, M. M., & Godínez Montoya, L. (2023). Innovación en Negocios Tradicionales: El Caso del Agave, Más Allá del Tequila. InnOvaciOnes de NegOciOs, 1(1), 18–31. https://doi.org/10.29105/revin1.1-442
16. Vázquez, J., & Loli, O. (2018). Compost and vermicompost as amendments in the recovery of a soil degraded by the management of Gypsphila paniculata. Scientia Agropecuaria, 9(1), 43–52. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.05

17. Yatoo, A. M., Ali, M. N., Baba, Z. A., & Hassan, B. (2021). Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea. A review. Agronomy for Sustainable Development, 41(1). https://doi.org/10.1007/s13593-020-00657-w
18. Zurita, F., Tejeda, A., Montoya, A., Sulbar, B., & Carre, A. (2022). Disposal Practices and Study Cases of Disposal Methods.
19. Hewitt P.G. (199), Física Conceptual, Física Conceptual, Primera Edición, Addison Wesley Longman, México, México.
20. Ohanian O., Markert J.T. (2009), Física para Ingeniería y Ciencias, Editorial McGraw-Hill, Texas, Estados Unidos de América.
21. Andrades, R. M., Moliner, A. A. & Masaguer, R. A. (2015), Practicas de edafología; Métodos didácticos para análisis de suelos, Universidad de la Rioja, España, 47 – 61.
22. López López, B., Gálvez Arce, P., Calleja Peláez, B., Méndez González, J., & Ríos Camey, J. M. (2018). Sustratos orgánicos en la germinación y crecimiento de Pinus ayacahuite var. veitchii (Roezl) Shaw en vivero. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(49), 109–122. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.156
23. Demir, I., Kuzucu, C. O., Ermis, S., & Öktem, G. (2023). Radicle emergence as seed vigour test estimates seedling quality of hybrid cucumber (Cucumis sativus L.) cultivars in low temperature and salt stress conditions. Horticulturae, 9(1), 3. https://doi.org/10.3390/horticulturae9010003
24. Sharma, A., Shukla, A., & Gupta, M. (2023). Effect of bioagents on cucumber seed mycoflora, seed germination, and seedling vigour. Scientific Reports, 13, 6052. https://doi.org/10.1038/s41598-023-30253-3
25. Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy (3rd ed.). Springer.
26. González, J. A., Languasco, P., & Prado, F. E. (2014). Efecto de las vinazas sobre la germinación de soja, trigo y quinoa en condiciones controladas. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 49(4), 473–481. https://doi.org/10.31055/1851.2372.v49.n4.9825
27. oguera, P., Ortiz, J., & Muñoz, M. (2003). Efecto del pH sobre la germinación de semillas de frijol (Phaseolus vulgaris L.) en diferentes sustratos. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 35(1), 5-13. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-38902016000100005
28. Puerta, A., Noguera, P., & Muñoz, M. (2012). Producción de plántulas de pimentón en sustratos orgánicos a base de mezclas con fibra de coco. Revista Científica UDO Agrícola, 12(2), 298–306. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4688395.pdf
29. [10] Barba Franco, J. de J. (2022). Características agronómicas de plantas de manzanilla (Matricaria chamomilla) elicitadas con ácido salicílico y el perfil fitoquímico de sus infusiones. [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara]

ACTIVIDAD INHIBITORIA DEL AGUARRÁS DE RESINA DE *Pinus Pseudostrobus* SOBRE 3 HONGOS FITOPATOGENOS

Rebeca de Carmen Peña Montes[1], Abril Munro Rojas[2], Mauro Manuel Martínez Pacheco[3], Crisanto Velázquez Becerra[4]

[1,2,4] Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, [3]Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.
0728809d@umich.mx

La resina de pino es un producto natural ampliamente utilizada en la industria farmacéutica por su versatilidad en diversas aplicaciones, la resina es una sustancia viscosa que fluye naturalmente o por incisiones de los arboles principalmente las especies de coníferas y abies (Riveros, 2017), siendo las coníferas la especie principal aprovechada para la obtención de este producto, en Michoacán destaca el aprovechamiento de *Pinus psedostrobus (CONAFOR, 2012)* para la obtención de la resina, la resina se obtiene por medio de practicar incisiones en los árboles el producto resultante se denomina oleorresina y se separa por medio de destilación obteniendo dos partes siendo una de ellas sólida y la otra liquida o volátil. La parte liquida denominada aguarrás o trementina es rica en terpenos y terpenoides los cuales le otorgan las características organolépticas y de resistencia al ataque de microorganismos e insectos a la madera de especies forestales (López-Álvarez, 2023), es por esto que se ensayó el aguarrás de la resina de pino sobre organismos fitopatógenos de importancia agrícola.

El objetivo de este trabajo fue ensayar la actividad inhibitoria del aguarrás de *Pinus pseudostrobus* en 3 organismos fitopatógenos; *Aspergillus sp., Collecotrichum acutatum y Fusarium sp.*

El aguarrás de *Pinus pseudostrobus* fue obtenido del Laboratorio de Calidad de la Brea, Aguarrás y Derivados de la Resina de Pino de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (FITECMA) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), las disoluciones evaluadas se prepararon a diferentes concentraciones de 0.5 a 100%, la actividad inhibitoria se ensayó en 3 microorganismos fitopatógenos; *Aspergillus sp., Collecotrichum acutatum y Fusarium sp.,* obtenidos del Laboratorio de Fisiología Celular de Instituto de Investigaciones Químico Biológicas(IIQB) de la UMSNH , los ensayos de inhibición se realizaron en sistema cerrado usando cajas Petri con agar papa dextrosa como medio de cultivo, el efecto inhibitorio se ensayó utilizando una metodología Kirby-Bauer modificada o sensidiscos añadiendo las diferentes concentraciones y sus respectivos controles, con una n=3, se evaluó la actividad inhibitoria midiendo el halo de inhibición formado alrededor de los discos impregnados también se observó al microscopio el daño ocasionado por los tratamientos.

Como resultados de este trabajo se observó inhibición en el crecimiento de los organismos fúngicos evaluados a concentraciones sin diluir, aunque en la disoluciones evaluadas no se mostró un efecto inhibitorio significativo, también se observó que la morfología de los organismos fue afectada con una menor esporulación, se concluyó que el uso de aguarrás de *Pinus pseudostrobus* si bien mostro una actividad inhibitoria en concentraciones altas, también es necesario evaluar otros métodos de aplicación ya que, al ser una sustancia volátil, se pierde fácilmente en el medio ambiente reduciendo su efecto inhibitorio, esta actividad se podría ensayar en sinergia con otros compuestos que puedan potenciar el efecto inhibitorio en los organismos evaluados.

INTRODUCCIÓN

La resina de pino es una sustancia ampliamente utilizad en las industrias químicas, esta fluye naturalmente al realizar incisiones en especies de árboles del genero *Pinus*, esta sustancia otorga protección a los arboles contra ataque de insectos y patógenos, es por este motivo que se busca en

este producto natural una alternativa para el control de hongos fitopatógenos de interés agrícola, ya que las enfermedades ocasionadas por estos organismos han ido en aumento propiciadas por el cambio climático y la proliferación de los monocultivos, además la bioplasticidad de estos organismos les ha vuelto resistentes a los fungicidas tradicional, esto hace necesario explorar alternativas que ayuden a mitigar las pérdidas por plagas en los cultivos agrícolas y que a sus vez no dañen la salud del medio ambiente y del ser humano. Es por esto que este trabajo pretende evaluar la resina de pino como método para combatir a estos organismos, los organismos sobre los que se ensayó la actividad inhibitoria del aguarrás se caracterizan por ser patógenos que atacan una amplia variedad de cultivos provocando pérdidas por lo que son de importancia económica, los cuales son *Aspergillus sp., Fusarium sp., y Collecotrichum acutatum.*

El género aspergillus contiene varias especies fitopatógenas de importancia, ya que afectan cultivos agrícolas tanto en el campo como en postcosecha está asociada a enfermedades de pudrición y moho, algunas especies también presentan actividad micotoxigénica, produciendo contaminación en productos agrícolas (Zakaria, 2024).

Collecotrichum acutatum es un patógeno importante con un aproximado de 600 especies que causan antracnosis en una amplia gama de plantas hospedantes debido a su gran diversidad fenotípica dentro del complejo, algunas especies tienen preferencias por hospedantes y regiones geográficas especificas (Damm *et al*, 2013; Jayawardenah, 2020), *C. acutatum* es un patógeno que afecta diversas especies incluyendo frutales tropicales y subtropicales alcanzando pérdidas económicas de hasta un 50% (Lio *et al*, 2018).

El género fúngico *fusarium es* causante de diversas enfermedades en cereales, las cuales incluye la plaga de la espiga. Varias especies de fusarium están involucradas en el desarrollo de enfermedades y la contaminación de alimentos por micotoxinas. (Karlsson, 2021). Los hongos fusarium son organismos que pueden estar presentes en las semillas, suelo y residuos de cultivos los cuales actúan como inoculo para el tizón de las plántulas, una enfermedad agrícola importante. (Philippot *et al*., 2013).

PARTE EXPERIMENTAL

Se ensayó la actividad inhibitoria de la parte liquida (aguarrás) de la resina de *Pinus pseudostrobus* la cual fue obtenida del Laboratorio de Calidad de la Brea y el Aguarrás del FITECMA, se ensayó con una metodología Kirby-Bahuer modificada o sensidiscos, a diferentes concentraciones 5, 10, 20 y 100% usando dimetilsulfóxido (DMSO) como disolvente y agua destilada, se colocaron 10µl de cada solución en el centro de la caja Petri con Agar Papa y Dextrosa (PDA) como medio de cultivo, sobre el disco de papel filtro se incorporó las solución de las diferentes concentraciones y se incorporaron 3 inóculos de cada organismos por caja con una réplica de 3 por tratamiento. Posterior a esto se dejaron crecer bajo condiciones de incubadora a 30ºC, y se midió el crecimiento una vez que los controles llegaron a la pared de la caja Petri, se midió el crecimiento tomando fotografías y utilizando el software IMAGE J.

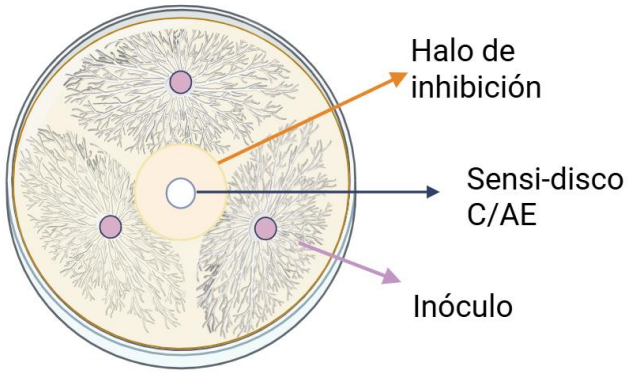


Ilustración 1: Acomodo de los ensayos de inhibición en caja Petri con PDA.

RESULTADOS

Tabla 1: Mediciones de los efectos de cada tratamiento en cm^2

Concentración Organismo	Control sin tratamiento	100%	20%	10%	5%
Aspergillus sp.	19.00 ± 2.33	12.64 ± 0.33	12.14 ± 0.38	13.47 ± 0.80	13.53 ± 1.08
Collecotrichum acutatum	15.75 ± 1.97	15.88 ± 1.36	15.03 ± 1.28	13.54 ± 1.46	17.25 ± 2.88
Fusarium sp.	15.52 ± 1.70	13.75 ± 0.33	12.91 ± 1.31	14.99 ± 0.78	13.97 ± 0.40

De acuerdo a los datos analizados al final del experimento se observa que las concentraciones de 100% y 20% tuvieron mayor efecto inhibitorio en los organismos *Aspergillus sp., y Fusarium sp.,* mientras que las concentraciones de 10% y 5% no mostraron un efecto inhibitorio significativo.

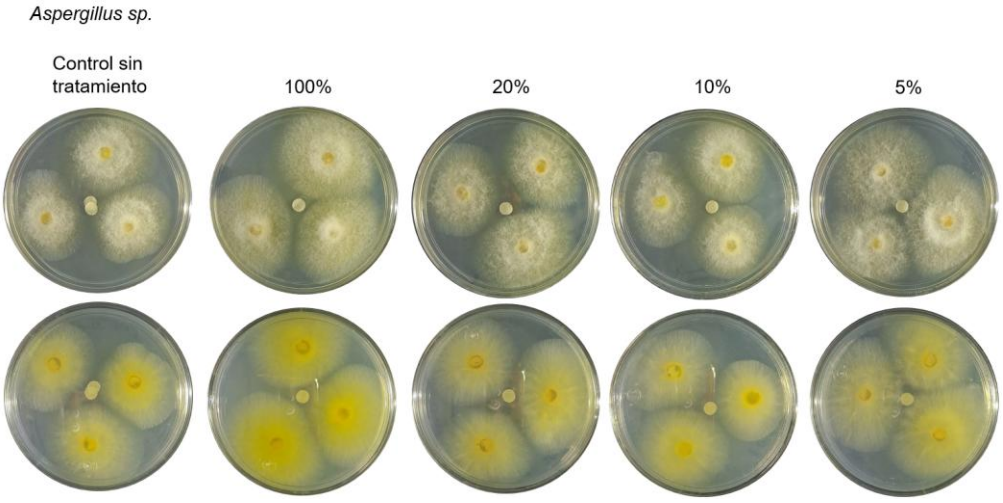


Ilustración 2: Efecto de los tratamientos en *Aspergillus sp.*, vista posterior arriba y vista anterior abajo.

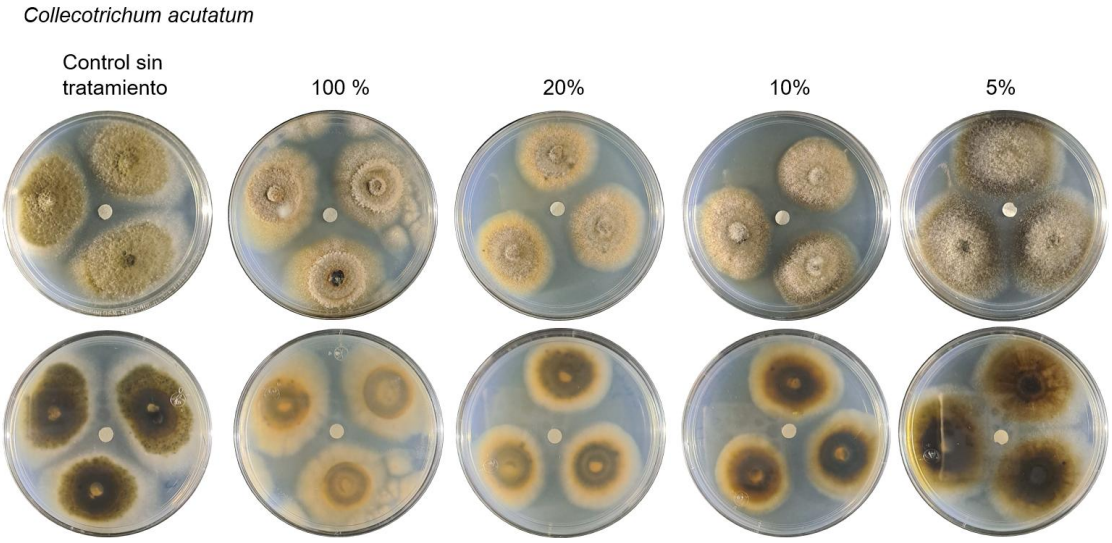


Ilustración 3: Efecto de los tratamientos en Collecotrichum acutatum, vista posterior arriba y vista anterior abajo.

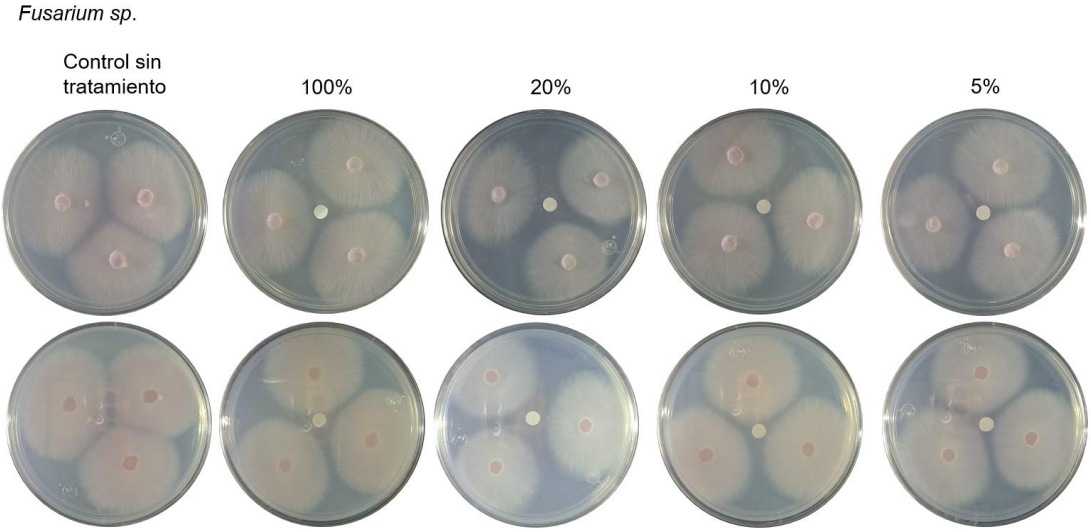


Ilustración 4: Efecto de los tratamientos en *Fusarium sp.,* vista posterior arriba y vista anterior abajo.

CONCLUSIONES

El uso de aguarrás de *Pinus pseudostrobus* si bien mostro una actividad inhibitoria en concentraciones altas siendo 100 % y 20 % las que mostraron mayor efecto, también es necesario evaluar otros métodos de aplicación ya que, al ser una sustancia volátil, se pierde fácilmente en el medio ambiente reduciendo su posible efecto inhibitorio, esta actividad también se podría ensayar en sinergia con otros compuestos que potencien el efecto inhibitorio en los organismos evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Comisión Nacional Forestal, “La producción de resina de pino en México”, (2012) Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT
2. Damm U., Cannon P.F., Woudenberg J.H.C, Crous P.W., The Colletotrichum acutatum species complex, Studies in Mycology, Volume 73, (2012), Pag 37-113, ISSN 0166-0616, https://doi.org/10.3114/sim0010
3. Karlsson I, Persson P., y Friberg H. Fusarium Head Blight From a Microbiome Perspective. Frontiers in Microbiology. 12:628373. (2021) doi: 10.3389/fmicb.2021.628373
4. López-Álvarez O., Zas R., Marey-Perez M., Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield, Industrial Crops and Products, Volume 202, 117105, (2023) ISSN 0926-6690, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117105."
5. Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., y Van der Putten, W. H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. Nature Reviews Microbiol. 11, pag. 789–799. (2013). doi: 10.1038/nrmicro3109
6. Riveros Alcedo, J. C., Cueva-Gálvez, G. E., & Gonzáles Mora, H. E. Evaluación de la oleorresina de Pinus oocarpa en la zona de Oxapampa, Pasco, Perú. Revista Forestal Del Perú, 32(1 pag. 45-55. (2017). https://doi.org/10.21704/rfp.v32i1.1036
7. Zakaria L. An Overview of Aspergillus Species Associated with Plant Diseases. Pathogens (Basel, Switzerland), 13(9), 813. (2024). https://doi.org/10.3390/pathogens13090813

CARACTERIZACIÓN MORFOLOGICA POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE FIBRAS RESIDUALES DE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL

Pedro Rubén Reyes Corral[1], Karla María Ortega Valdez[1], Edgar Gustavo López Saut[1], Carmen Zulema Quiñones[1],Manuel Ismael Mata Escobeto[1],Veronica Loera Castañeda[2] y Jazmín Ramírez Ayala[1].

[1]Tecnologico Nacional de Mexico Campus Valle del Guadiana, [2]Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional Campus Durango.

M23790002@vguadiana.tecnm.mx

RESUMEN

La industria del mezcal en México ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por la creciente demanda nacional e internacional de este destilado de agave. Sin embargo, este auge ha generado desafíos ambientales, como la gestión inadecuada de residuos (pencas, bagazo y vinazas), que impactan negativamente en suelos y cuerpos de agua. En 2023, la región de Durango produjo 130,964 litros de mezcal [1], utilizando *Agave durangensis*, cuyos residuos podrían aprovecharse para aplicaciones textiles, siguiendo el ejemplo de otras especies de agave como *Agave salmiana* o el *Agave tequilana* [2], ampliamente utilizada en la producción de fibras textiles en el Valle del Mezquital, Hidalgo. No obstante, la falta de información actualizada sobre la morfología del Agave durangensis limita su potencial uso.

Este estudio se enfocó en caracterizar las fibras de este agave mediante microscopía confocal de barrido láser, aprovechando la autofluorescencia de la lignina, un componente clave de la pared celular vegetal, para identificar microestructuras. Se realizaron cortes verticales y horizontales de las fibras, montándose en portaobjetos con glicerol como agente fijador. La visualización inicial con microscopía óptica inversa permitió identificar campos de interés y evaluar la calidad de las muestras. Posteriormente, se utilizó microscopía confocal para analizar las estructuras con mayor detalle, alternando objetivos de 10x y 20x.

Los resultados revelaron la presencia de nanofibras de celulosa (NNF) en las fibras secundarias, mostrando una morfología alargada con ondulaciones remanentes, similares a un resorte estirado. Se observó que las NNF eran más delgadas en los extremos, sugiriendo una ruptura por tensión al separarse de la fibra principal. Además, se identificó una concentración de NNF en los conductos de hemicelulosa, ocupando más de la mitad del diámetro de la fibra secundaria. Esta distribución compacta podría explicar la mayor densidad de las fibras de *Agave durangensis* en comparación con otras fibras de agave, cuyas estructuras presentan una dispersión más amplia y mayores espacios vacíos. En el bagazo, la visualización se centró en las estructuras externas debido a la interferencia causada por la pigmentación del material. Se observaron canales de hemicelulosa en la región central de la fibra, pero no se detectaron NNF en estructura compacta, posiblemente debido a la degradación de la celulosa durante la fermentación o la pérdida de fluorescencia. La ausencia de marcas perpendiculares en los conductos sugiere que las ramificaciones de lignina o celulosa pudieron degradarse durante el proceso de producción del mezcal. Los resultados indican que las fibras de *Agave durangensis* poseen propiedades físicas adecuadas para su uso en la elaboración de fibras textiles, tanto a nivel residencial como comercial.

INTRODUCCIÓN

Durante la ultima década, la producción nacional de mexica ha estado aumentando hasta llegar a los 12,239,655 litros en 2023 [1], de los cuales Durango produce el 1.07% de la producción nacional estando en el cuarto puesto de producción de mezcal a nivel nacional. No obstante, el aumento de producción de mezcal representa diversas adversidades para las comunidades en donde se instalan las vinatas de producción de mezcal, principalmente en el sector de manejo y tratamiento de

residuos. Durante el proceso de producción de mezcal, se obtienen 3 principales residuos: las pencas, que son las hojas del agave que se extienden desde la base o piña hasta la punta o espina de la hoja, las vinazas, que son residuos líquidos remanentes del proceso de destilación de la piña fermentada y el bagazo, que es el residuo solido con consistencia fibrosa resultante del proceso de destilación, mismos que tienen un impacto negativo en el ecosistema debido a problemas como la acidificación de suelos y cambio del paisaje local [3].

Con la tendencia global por adoptar modelos de producción y cadenas de suministro sostenibles, se ha acrecentado la necesidad por explorar alternativas para el aprovechamiento de los residuos de los sectores industriales. En este marco, el aprovechamiento de los subproductos generados de la industria mezcalera, debido a las propiedades físico-quimicas que poseen han sido estudiadas y aprovechadas en diversos sectores.

En el campo de los biomateriales, Thamae et al. [4] reportaron que al combinar fibras naturales con polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), se logran compuestos apropiados para la fabricación de paneles para techos, destacando mejoras tanto en la resistencia a la tracción como en la estabilidad térmica. Por su parte, Langhorst et al. [5,6] utilizaron fibras de agave en mezclas con polipropileno, observando una mejora en las propiedades mecánicas lo que resalta el potencial que tienen las fibras de agave para mejorar materiales con matrices de otros materiales existentes.

Sin embargo, se han obtenido excelentes resultados con procesos de producción de textiles artesanales con niveles de tecnificación mucho mas bajos. En el Valle del Mezquital, en Hidalgo, México los artesanos locales Hñähñu continúan la elaboración de textiles y vesanias fabricadas con ixtle extraído de diversas especies de agaves mediante el uso exclusivo de técnicas tradicionales de trabajo en el proceso de hilado de las fibras y en la técnica del tejido de las mismas para la producción de los diferentes objetos que abarcan el repertorio de artesanías producidas en esta zona [1]. Las fibras obtenidas de las diferentes especies de agave en la zona principalmente *Agave americana*, *Agave lechuguilla*, and *Agave sisalana* han sido ampliamente estudiadas lo que resulta en un aprovechamiento optimo de los recursos, sin embargo hay otras especies de agave disponibles en el área como el *Agave salmiana* y *Agave mapisaga* que obtuvieron resistencias mecánicas similares a la ya utilizadas [7]. Se han realizado estudios donde se establece la relación entre la estructura de la fibra y del contenido de celulosa del material lignocelulosico que compone la fibra de agave [8]. Por lo que la caracterización morfológica y físico-química resulta de vital importancia para el aprovechamiento optimo de las fibras de agave.

De igual manera, la información disponible sobre las propiedades físico-químicas del *Agave durangensis* es considerablemente escasa, por lo que el aprovechamiento de los subproductos obtenidos del mismo resulta mas desafiante. Tomando ventaja de la propiedad de la lignina para florescer de manera natural [9], la caracterización morfológica del *agave durangensis* resulta una opción viable para la visualización de las estructuras internas de la fibra así como el acomodo estructural de la celulosa, hemicelulosa y lignina. En este contexto, la caracterización morfológica de las fibras de *Agave durangensis* representa una alternativa importante para la comprensión de las propiedades de estos residuos, abriendo nuevas oportunidades para el aprovechamiento sostenible de los residuos de la industria mezcalera y contribuyendo a reducir su impacto ambiental.

TEORÍA

Agave durangensis

Conocido por su nombre comun “cenizo” el *Agave durangensis* es parte de la familia *Asparagaceae* perteneciente a la region de Durang, es de colo gris glauco. De superficie aspera y cerosa, el mismo se ha utilizado desde finales de la decada de los 70 para la produccion de mezcal en la region [10,11].

Mezcal

El mezcal es una bebida que se obtiene al destilar los tallos o jugos fermentados que han sido cocitos y que han sido triturados o molidos, estos materiales pueden provenir de diversas especies de agave, según las COMERCAM, el mezcal se debine como una “bebida alcohólica destilada mexicana, 100% proveniente del maguey o agave, obtenida mediante la destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de las cabezas maduras del maguey o agaves cocidos, cosechados en el territorio cubierto por la Denominación de Origen Mezcal (DOM)” [12].

Micoscopia confocal de barrido laser

El concepto de confocalidad hace referencia a que dos planos focales —el del objetivo y el del detector— están alineados en una misma posición conjugada. En microscopía, esto significa que solo el plano que está en foco es captado con claridad, mientras que los planos cercanos en el eje z quedan excluidos. La microscopía confocal se distingue precisamente por utilizar un punto de luz altamente enfocado para iluminar la muestra, junto con un pequeño orificio (pinhole) situado en el camino de la luz emitida. Este orificio está alineado con el punto focal, lo que permite eliminar información desenfocada y lograr un seccionamiento óptico preciso [13].

El microscopio confocal de barrido láser (CLSM, por sus siglas en inglés) está diseñado para obtener imágenes precisas de muestras fluorescentes con cierto grosor, al eliminar la señal proveniente de zonas que no están en el plano focal. Esto se consigue mediante un haz láser enfocado que recorre la muestra, en conjunto con un orificio (pinhole) ubicado en el trayecto de la luz recolectada, justo antes del plano de imagen. Este diseño permite filtrar la luz dispersa fuera de foco y captar únicamente la emitida desde el plano enfocado.Actualmente, los microscopios confocales modernos parten de una base de epifluorescencia, a la que se integran múltiples fuentes láser y una cabeza de escaneo especializada. Esta última incorpora filtros para fluorescencia, un sistema de escaneo con galvanómetros, pinholes ajustables y detectores tipo tubo fotomultiplicador (PMT), capaces de registrar señales en distintas longitudes de onda. El láser se expande para cubrir toda la apertura trasera del objetivo, generando un punto de alta intensidad que se mueve sobre la muestra siguiendo un patrón tipo raster; de ahí la denominación "confocal por escaneo puntual".La fluorescencia generada en ese punto enfocado atraviesa el pinhole, mientras que la luz fuera de foco, al dispersarse más, no logra pasar y es descartada. El detector PMT convierte esa señal luminosa en un voltaje proporcional a la intensidad detectada. A medida que el láser escanea la muestra en tiempo real, estas señales se digitalizan, construyendo una imagen que puede visualizarse píxel a píxel en una pantalla.Gracias a esta capacidad de excluir la información no deseada y mejorar la relación señal/ruido, el microscopio confocal puede generar cortes ópticos de alta resolución en distintos niveles de profundidad (eje z), alcanzando entre 10 y 50 micrómetros. Posteriormente, estos cortes pueden apilarse para formar reconstrucciones tridimensionales mediante software especializado, facilitando la visualización de la muestra en distintos planos (x,y; x,z; y,z).La calidad final de la imagen obtenida depende de múltiples variables: el tipo de objetivo utilizado, el tamaño del pinhole, las características del láser, la velocidad del escaneo y los ajustes de ganancia y compensación del PMT. Sin embargo, esta técnica puede tener limitaciones cuando se trabaja con fluorescencia muy tenue o señales pequeñas y puntuales, en comparación con otros métodos de microscopía [14].

PARTE EXPERIMENTAL

El análisis de la morfología se realizo en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional unidad Durango (CIIDIR Durango), se seleccionaron las fibras mas largas de penca (25 – 30 cm) y bagazo (18 – 22 cm) posterior a un proceso de deshidratación en camas de secado al aire libre a una temperatura media de 20°C ± 1°C y con una humedad de 56.9% ± 2.56% por un periodo de 3 semanas. Posteriormente, se tomaron 5 fibras al azar de cada tipo de muestra a las que se secciono en fibras mas cortas de 2 cm. Una vez obtenidas las fibras mas cortas, se realizaron cortes longitudinales y trasversales para obtener muestras de 2 mm ± 0.2 mm de grosor utilizando un escalpelo de acero inoxidable de grado quirúrgico. Este proceso se realizo hasta

obtener 10 muestras de un grosor uniforme en las muestras y un largo de mas de almenos 1 cm en los cortes longitudinales.

Para la fijación de las muestras al portaobjetos se utilizo glicerol de grado biología molecular colocando las muestras de cada tipo de muestra en el centro del portaobjetos y aplicando en el centro del conjunto de muestras 2 gotas de agente fijador a lo que se le dio tiempo de que todas las muestras entraran en el la matriz del reactivo antes de colocar el cubreobjetos, esto con el fin de evitar el desbordamiento del gricerol por los bordes del portaobjetos. Con el objetivo de evitar el movimiento del cubreobjetos una vez fijada la muestra, se aplico una fina capa de esmalte para uñas transparente en los bordes del cubreobjetos y se dejo secar por 24 horas.

Una vez fijada la muestra y seco el esmalte, se utilizo un microscopio óptico inverso para identificar campos claros libres de burbujas o contaminantes que pudieran interferir con la observación de la muestra con el microscopio confocal. Los campos identificados se analizaron con un microscopio confocal de fluorescencia por barrido laser Leica DMi 8 – Leica TCS SP8. Los campos identificados en la seccion anterior fueron centrados en el campo de vision del objetivo x10 y posteriromente se incidio el laser para iniciar el proceso de fluorescencia de las fibras. La auscencia de agente colorante se debe a la fluorescencia natural de la lignina, mismo que es un componente principal del as fibras de *Agave durangensis*. Una vez identificadas estructuras o campos e interes se cambio al objetivo x 20 para evaluarlo con mas detalle detalle.

RESULTADOS

Los resultados revelaron en las fibras de penca la presencia de nanofibras de celulosa (NNF) en las fibras secundarias, mostrando una morfología alargada con ondulaciones remanentes, similares a un resorte estirado (Fig. 1 a). Se observó que las NNF eran más delgadas en los extremos, sugiriendo una ruptura por tensión al separarse de la fibra principal. Además, se identificó una concentración de NNF en los conductos de hemicelulosa, ocupando más de la mitad del diámetro de la fibra secundaria. Esta distribución compacta podría resultar en mayor densidad de las fibras de *Agave durangensis*, cuyas estructuras presentan una dispersión más amplia y mayores espacios vacíos.

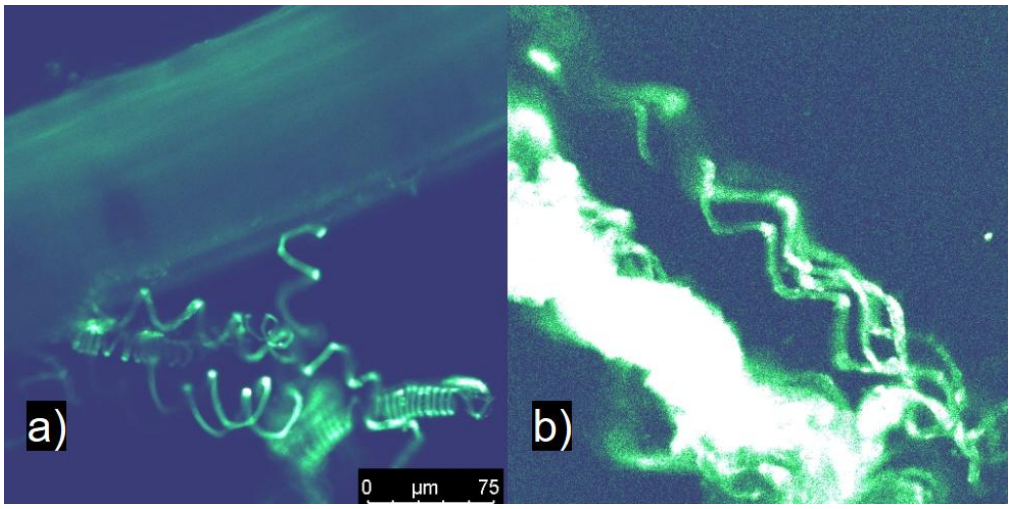


Figura 1. Nanofibras de celulosa saliendo de fibra principal a) y cúmulo. De nanofibras separadas de la fibra principal b). Fuente: Elaboracion propia.

En el bagazo, la visualización se centró en las estructuras externas debido a la interferencia causada por la pigmentación del material. Se observaron canales de hemicelulosa en la región central de la fibra (Fig. 2 b), pero no se detectaron NNF en estructura compacta, posiblemente debido a la degradación de la celulosa durante la fermentación o la pérdida de fluorescencia.

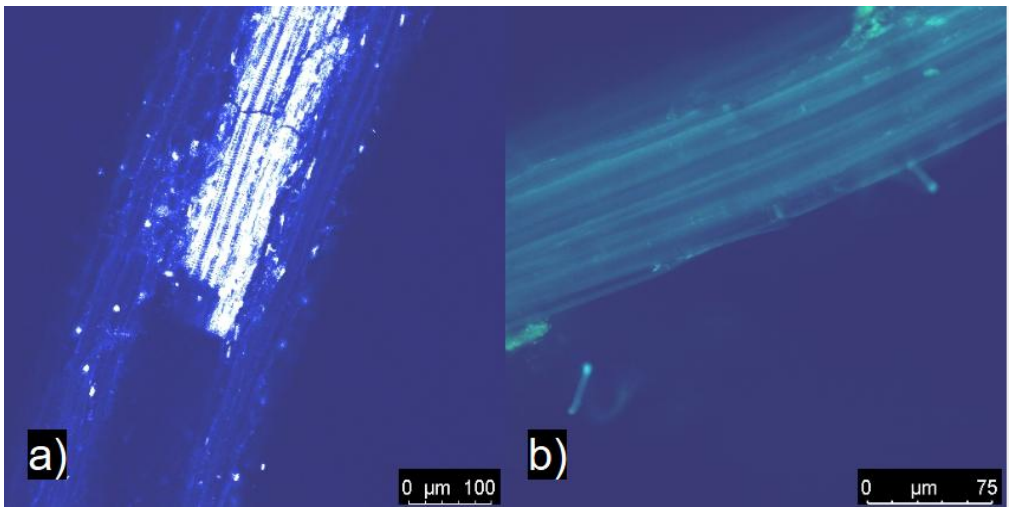


Figura 2. Fibras de celulosa dentro de fibra principal de penca a) y fibra principal de bagazo donde se pueden visualizar los conductos principales de la fibra b).

CONCLUSIONES

Las fibras de *Agave durangensis* presentan características morfológicas prometedoras para posibles aplicaciones, destacando la presencia de nanofibras de celulosa (NNF) con distribución compacta en conductos de hemicelulosa, similares a especies ya utilizadas en la industria textil. Este aprovechamiento de residuos agroindustriales reduciría el impacto ambiental de la producción de mezcal. Futuros estudios deben evaluar propiedades mecánicas y escalabilidad para consolidar su viabilidad técnica así como económica.

Agradecimientos

Agradezco a la academia de genómica del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional campus Durango, al laboratorio Nacional CONAHCYT de Biocombustibles Sólidos (BIOENER) (ApoyoLNC-2023-40), al Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, al Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por el apoyo brindado con sus equipo e instalaciones para la realización de este estudio y a la mezcalera Tradiciones Mezcaleras S.P.R. de R.L. de la vinata Madre Tierra por donar las muestras utilizadas en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. COMERCAM (2024). Informe Estadístico 2024; Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A. C.: Oaxaca, México, 2024; Available online: https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf
2. Reyes-Samilpa, A., Reyes-Agüero, J. A., Álvarez-Fuentes, G., Aguirre Rivera, J. R., & van´ t Hooft, A. (2022). Physical Characterization of the Fibers of Agave salmiana and A. mapisaga (Asparagaceae) from the Mezquital Valley, Mexico. Journal of Natural Fibers, 19(10), 3710-3717.
3. Garzón Rocha, E. C. y Rodríguez Leiton, M. C. (2023) Aprovechamiento de residuos generados en procesos agroindustriales en la industria mezcalera. [Trabajo de grado,

Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. https://hdl.handle.net/20.500.11839/9313
4. Thamae, T., & Baillie, C. (2007). Influence of fibre extraction method, alkali and silane treatment on the interface of Agave americana waste HDPE
5. Langhorst, A. E., Burkholder, J., Long, J., Thomas, R., Kiziltas, A., & Mielewski, D. (2018). Blue-agave fiber-reinforced polypropylene composites for automotive applications. BioResources, 13(1), 820-835.
6. Langhorst, A., Paxton, W., Bollin, S., Frantz, D., Burkholder, J., Kiziltas, A., & Mielewski, D. (2019). Heat-treated blue agave fiber composites. Composites Part B: Engineering, 165, 712-724.
7. Kicińska-Jakubowska, A., Bogacz, E., & Zimniewska, M. (2012). Review of natural fibers. Part I—Vegetable fibers. Journal of Natural Fibers, 9(3), 150-167.
8. Sahoo, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2017). Mechanical, thermal, and interfacial characterization of randomly oriented short sisal fibers reinforced epoxy composite modified with epoxidized soybean oil. Journal of Natural Fibers, 14(3), 357-367.
9. Donaldson, L. (2013). Softwood and hardwood lignin fluorescence spectra of wood cell walls in different mounting media. Iawa Journal, 34(1), 3-19. https://doi.org/10.1163/22941932-00000002
10. González-Elizondo, M., Galván-Villanueva, R., López-Enríquez, I. L., Reséndiz-Rojas, L., & González-Elizondo, M. S. (2009). Agaves-magueyes, lechuguillas y noas-del Estado de Durango y sus alrededores. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango del Instituto Politécnico Nacional-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Durango, México.
11. Vázquez-García, J. A., & Cázaro, M. D. J. (2007). Taxonomía Del Género Agave En El Occidente De México: Una Panorámica Preliminar.
12. Secretaría de Economía. (2016). NOM-070-SCFI-2016: Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6437/seeco11_C/seeco11_C.html. Consultada: Septiembre, 2024.
13. Bayguinov, P. O., Oakley, D. M., Shih, C. C., Geanon, D. J., Joens, M. S., & Fitzpatrick, J. A. (2018). Modern laser scanning confocal microscopy. Current protocols in cytometry, 85(1), e39.
14. Hard, R., Hipp, J., Tangrea, M. A., & Tomaszewski, J. E. (2014). Applications of image science in pathology and cell biology.

ENZIMAS EXTRACELULARES: FACTORES DE PATOGENICIDAD EN BACTERIAS HETERÓTROFAS AISLADAS DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN CUAUTEPEC (TLACUILOTEPEC, PUEBLA, MÉXICO)

Adriana Vargas-Rosas[1], María Teresa Núñez-Cardona[1], Patricia Castilla Hernández[1] y María Guadalupe Ramos Espinosa[2].

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco: Departamento del El Hombre y su Ambiente[1]. Departamento de Producción Agrícola y Animal[2].
mtnunez@correo.xoc.uam.mx

RESUMEN

En general, las bacterias en los ambientes acuáticas son benéficas al producir enzimas esenciales para la degradación y reciclamiento de la materia orgánica, sin embargo, algunas de estas pueden ser perjudiciales para la salud humana al producir enzimas que dañan tejidos y favorecen procesos infecciosos que finalmente ocasionan la muerte. Dentro de estas enzimas está las gelatinasas, enzimas proteolíticas que intervienen en la digestión de las proteínas de alimentos, coagulación de la sangre, por medio de la trombina (serin proteasa). Así mismo, los leucocitos y los macrófagos en los sitios de infección liberan colagenasas y gelatinasas en formas de proenzima, que pueden activarse mediante la escisión por proteasas bacterianas, aumentando así el nivel de daño local. Este es también el caso de algunas infecciones bacterianas de la superficie ocular, que pueden causar daños corneales graves y permanentes y, por lo tanto, afectar la visión[1,2]. Otras enzimas como las lipasas, se producen constitutivamente, aunque su producción puede estar dada por las condiciones nutritivas y físicas del cultivo; algunas pueden hidrolizar triglicéridos exógenos para dar origen a ácidos grasos libres que pueden usarse como recurso energético. Algunas bacterias también producen ADNasas, que hidrolizan el ADN generando una mezcla de mono y polinucleótidos, las especies de *Staphylococcus*, producen cantidades grandes de ADNasa extracelular[3]. El objetivo de la presente investigación fue aislar bacterias de agua para consumo humano en Cuautepec (Tlacuilotepec, Puebla) y determinar la producción de enzimas extracelulares como factores de patogenicidad. Se colectaron muestras de agua del manantial Acatitla (AM), pozo la Concha (LC) y agua de la llave (ALL). Con las muestras se hicieron diluciones seriadas en solución salina (0.08%) y con 0.1 ml de estas, fueron inoculadas cajas Petri conteniendo agar nutritivo, después de 24-48 horas de incubación se hicieron aislamientos de colonias al azar y se aplicó la técnica de siembra y resiembra hasta obtener cultivos puros a los que se les determinó su capacidad de producir enzimas extracelulares (lipasa, gelatinasa, ADNasa) y al polisacárido de Levan, todos estos considerados factores de patogenicidad. Se obtuvieron 52 cultivos bacterianos: 22 de LC, 12 de ALL y 18 de AM. En LC, los microorganismos predominantes fueron cocos Gram positivos (41%), seguidos de bacilos Gram positivos (14%), bacilos esporulados Gram positivos (14%), cocobacilos Gram negativos (18%), bacilos Gram negativos (9%) y cocos Gram negativos (4%). En ALL, los cocobacilos Gram negativos fueron los más abundantes (58%), seguidos de bacilos Gram negativo! s (25%) y bacilos Gram positivos (17%). En AM, predominaron los cocobacilos Gram negativos (44%), seguidos de bacilos Gram negativos (17%), cocos Gram positivos y negativos (11% cada uno), bacilos Gram positivos (11%) y bacilos esporulados Gram positivos (6%). Respecto a la producción enzimática, en LC el 91% de los cultivos presentaron actividad gelatinasa, el 64% amilasa, el 59% ADNasa, el 32% lipasa y el 14% ureasa y polisacárido de levan. En ALL, el 83% de los cultivos produjeron lipasa, el 58% ADNasa, el 33% gelatinasa y el 17% amilasa. En AM, el 50% mostró actividad amilasa, el 44% ADNasa y lipasa, el 33% gelatinasa, el 28% polisacárido de levan y el 17% ureasa. Estos resultados indican que muchas de las bacterias aisladas tienen potencial patogénico, resaltando la importancia de monitorear la calidad del agua para prevenir riesgos a la salud humana.

INTRODUCCIÓN

Las bacterias cumplen funciones ecológicas esenciales en los ambientes que habitan tales como la descomposición de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, control de microorganismos

patógenos etc. Sin embargo, algunas especies bacterianas pueden representar un riesgo para la salud humana al producir compuestos bioactivos como son enzimas extracelulares (hidrolíticas) que facilitan procesos infecciosos y su permanencia en el hospedero. Dentro de estas enzimas están las gelatinasas (enzimas proteolíticas) que, por ejemplo, intervienen en la digestión de las proteínas de alimentos, coagulación de la sangre por medio de la trombina (serin proteasa). Así mismo, los leucocitos y los macrófagos en los sitios de infección liberan colagenasas y gelatinasas en forma de proenzima, que pueden activarse mediante la escisión por proteasas bacterianas, aumentando así el nivel de daño local. Este es también el caso de algunas infecciones bacterianas de la superficie ocular, que pueden causar daños corneales graves y permanentes y, por lo tanto, afectar la visión[1,2]. Otras enzimas como las lipasas, se producen constitutivamente, aunque esto último depende de las condiciones nutritivas y físicas del medio; las lipasas también hidrolizan triglicéridos exógenos para dar origen a ácidos grasos libres que pueden ser utilizados como recursos energéticos. Distintas bacterias producen ADNasas, que hidrolizan ADN generando una mezcla de mono y polinucleótidos, especies de *Staphylococcus* producen cantidades grandes de ADNasa extracelular[3]. La amilasa, al degradar almidones en la boca, genera azúcares simples que sirven como sustrato para bacterias orales, facilitando la formación de biopelículas y contribuyendo al desarrollo de caries[4]. Por su parte, la ureasa permite a bacterias como *Helicobacter pylori* sobrevivir en ambientes hostiles como el estómago, neutralizando la acidez mediante la producción de amoníaco, lo que puede desencadenar gastritis o úlceras[5]. Finalmente, la producción del polisacárido de levan es clave para la formación de biopelículas bacterianas en diversas especies, proporcionando protección estructural, resistencia antimicrobiana y facilitando la adherencia a superficies, incrementando así su capacidad patógena[6]. El conocer de estas enzimas no solo permite entender los mecanismos de patogenicidad bacteriana, sino que también, ofrece identificar zonas en el organismo donde un fármaco ejerce su acción y aplicaciones en el ámbito de la biotecnología. En zonas rurales donde el acceso al agua potable depende, generalmente, de fuentes naturales o semitratadas, es crucial la detección e identificación de bacterias patógenas, y una forma de hacerlo, es mediante el análisis de la producción de enzimas extracelulares por las bacterias. El objetivo de la presente investigación fue aislar bacterias de agua para consumo humano en Cuautepec (Tlacuilotepec, Puebla) y determinar la producción de enzimas extracelulares como factores de patogenicidad.

TEORÍA

Las bacterias son organismos con una amplia diversidad funcional y metabólica, son fundamentales en los ambientes donde habitan, debido a los servicios ecosistémicos que brindan, de entre sus funciones ecológicas están la descomposición de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y el control biológico de microorganismos patógenos[7]. Estas funciones son vitales para el mantenimiento del equilibrio en los ecosistemas y en general, para la salud ambiental, sin embargo, las actividades humanas enriquecen el agua con sustratos específicos que estimulan a bacterias acuáticas a producir enzimas para sobrevivir y proliferar. Estas proteínas no solo degradan contaminantes, sino que también pueden estar relacionadas con la aparición de bacterias patógenas oportunistas en ambientes acuáticos alterados[8]. Para cumplir con tales funciones, estos microorganismos producen compuestos bioactivos como las enzimas extracelulares, mismas que pueden ser perjudiciales para los humanos y otros animales, ya que la producción de estas enzimas está asociada a su patogenicidad, debido a su contribución, para la colonización, invasión, permanencia, daño físico de tejidos y órganos de hospedero, por actividad bacteriana.

Además de su papel en la patogénesis, estas enzimas hidrolíticas tienen un gran potencial en la biotecnología moderna. Su capacidad para descomponer compuestos complejos las convierte en herramientas valiosas en procesos industriales, como por ejemplo, las lipasas por sus propiedades catalíticas, son aprovechadas en procesos industriales como por ejemplo, en aditivos para la elaboración de detergentes; en la industria alimentaria, para la elaboración de productos dietéticos con bajo nivel de grasas y colesterol; en la industria del papel, se utilizan para eliminar la cera de la pulpa del papel; en la industria farmacéutica son de utilidad para la obtención de moléculas bioactivas así como en procesos de síntesis química para la obtención de compuestos ópticamente puros, modificación de grasas y otros lípidos por hidrólisis y esterificación[9]. La purificación de amilasa

reduce la formación de biopelículas lo cual se debe a su capacidad de hidrolizar polisacáridos, debilitando la estructura de biopelículas y facilitando la eliminación de las bacterias adheridas.
Sin embargo, una sola enzima no es suficiente para reducir la formación de biopelículas, por lo que, la combinación de levan hidrolasa, amilasa y dextrina hidrolasa han ayudado a eliminar biopelículas de superficies abióticas y bióticas[10]**.** El uso controlado de estas enzimas permite desarrollar aplicaciones beneficiosas, como la eliminación de residuos orgánicos o la síntesis de productos de alto valor añadido, destacando la importancia de un enfoque dual que reconozca tanto su riesgo en salud pública como su valor en aplicaciones biotecnológicas. En los siguientes párrafos se describen algunas características de los compuestos (enzimas y polisacáridos) ensayados en el presente estudio, así como las formas en que intervienen.

Gelatinasa
La gelatinasa es una enzima que hidrolasa proteínas (proteasa), degrada la gelatina (una forma desnaturalizada del colágeno) y otras proteínas estructurales de la matriz extracelular, facilitando la diseminación y la formación de biopelículas que ayudan a las bacterias a sobrevivir y la resistencia a antibióticos. Esta enzima es producida por algunas bacterias como *Enterococcus faecalis* que le facilita actuar sobre el sistema inmune además formar biopelículas para invadir tejidos lo que dificulta la efectividad de antibióticos y controlar la infección [11,12]. Además, las gelatinasas pueden activar otras enzimas del sistema inmune, como colagenasas liberadas por leucocitos y macrófagos, exacerbando el daño tisular local. Estas enzimas están involucradas en diversas patologías, incluyendo infecciones oculares, donde pueden provocar daños corneales severos que afectan la visión permanentemente.

Lipasas
Las lipasas bacterianas hidrolizan lípidos, especialmente triglicéridos formando ácidos grasos y glicerol, los cuales pueden ser utilizados como fuente de energía [8]. Estas enzimas se producen en diversas condiciones ambientales, que permite a las bacterias adaptarse a diferentes fuentes nutricionales. Sin embargo, algunas bacterias patógenas producen lipasas como factores de patogenicidad, infectando y dañando al hospedero[13]. Por ejemplo, las lipasas de *Staphylococcus aureus* degradan grasas de la piel que facilitan la colonización y la formación de abscesos en el hospedero[10] en tanto que las de *Pseudomonas aeruginosa* le ayudan a destruir membranas celulares y tejidos lo que es común en infecciones pulmonares y quemaduras[14]. Cabe señalar que *P. aeruginosa* provoca infecciones osteoarticulares, endocarditis, shock séptico, neumonía necrotizante, entre otras enfermedades mortales

ADNasas
Las ADNasas hidrolizan ácidos nucleicos, ADN, produciendo oligonucleótidos (factores de patogenicidad), involucrándose en el crecimiento bacteriano y la maduración de biopelículas, también facilitan a las bacterias, escapar del sistema inmunológico[15]. Algunas bacterias, como las pertenecientes al género *Staphylococcus*, son conocidas por su producción alta de ADNasa extracelular, que les permite evadir el sistema inmune al destruir trampas extracelulares formadas por neutrófilos (NETs), estos, atrapan y matan a las bacterias extracelulares (compuestas de cromatina y proteínas granulares), su estructura se disipa y se daña por actividad de la ADNasa[16].

Amilasa
La amilasa hidroliza almidones (polisacáridos) en azúcares más simples, por ejemplo, la α-amilasa, en la saliva humana se une a las proteínas de unión a la α-amilasa (ABP) que están presentes en las superficies bacterianas. Al degradar almidones en la boca, los productos resultantes, que son la glucosa y la maltosa son metabolizadas por las bacterias orales para formar la biopelícula de la placa dental[13] y la consecuente formación de caries[4], lo que evidencia que la producción de amilasa conlleva a daños dentales, aunque también, es conocido que esta enzima facilita e inicia la digestión del almidón que está disponible en los alimentos.

Ureasa

Algunos microbios patógenos utilizan la urea como fuente de nitrógeno gracias a la enzima ureasa, que la convierte en amoníaco y ácido carbámico, el cual se descompone espontáneamente generando más amoníaco[5], aunque, en bacterias como *Helicobacter pylori*, el amoníaco neutraliza la acidez del estómago, permitiendo su sobrevivencia en un ambiente hostil. Además, este compuesto nitrogenado es tóxico para las células del hospedador, lo que contribuye a la inflamación y daño tisular provocando, por ejemplo, gastritis y úlceras [17]. Ejemplos de otras especies ureasa positivas son *Klebsiella pneumonia, Staphylococcus aureus, Staphylococcus saprophyticus* y *Pseudomonas aeruginosa*, las cuales son bacterias patógenas, presentes en pacientes con infecciones de tracto urinario, en donde abunda la urea[18].

Polisacárido de Levan

El polisacárido Levan es un homopolímero de fructosa y aparece en la naturaleza como un componente estructural importante de algunas biopelículas bacterianas, como en muchas bacterias Gram negativas (Ej. *Acetobacter diazotrophicus*, *Pseudomonas syringae*, *Erwinia amylovora*) y Gram positivas (Ej. *Bacillus subtilis*,*Streptococcus mutans*)[6]. La producción de polisacáridos proporciona a las bacterias una matriz protectora (biopelícula), favoreciendo la adhesión a superficies (Ej. dientes), evasión del sistema inmune y resistencia a antibióticos. Esto es clave en enfermedades como la caries dental en donde es común *Streptococcus mutans*[6]; por otro lado, a *Pseudomonas aeruginosa* le facilita su fijación y soporte estructural para la formación de biopelículas mucoides aumentando su patogenicidad[19], además de favorecer su resistencia múltiple a los antibióticos

PARTE EXPERIMENTAL

Cuautepec es una comunidad del municipio de Tlacuilotepec, localizada en la Sierra Norte de Puebla, el clima es cálido con lluvias todo el año. El agua que se utiliza en esta comunidad, para sus actividades cotidianas (consumo, preparación de alimentos, etc.) proviene, de manera secuencial del Manantial Acatitla (AM), pozo La Concha (LC) y Agua de la llave (All).

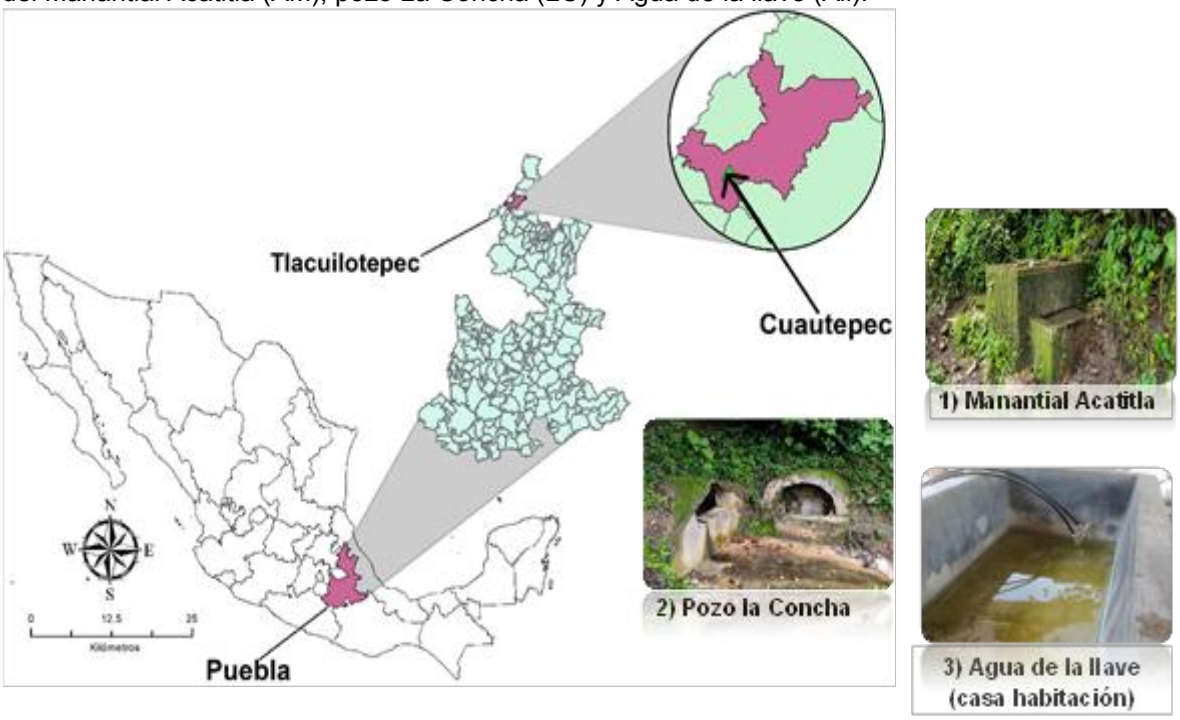


Figura 1. Ubicación de Cuautepec, Tlacuilotepec (Noroeste de Puebla) y sitios de muestreo 1-Manantial Acatitla (origen), 2-Pozo La Concha y 3-Agua de la llave (casa habitación).

De los tres sitios, se colectaron, de forma directa, muestras de agua con recipientes estériles, estas fueron transportadas en una hielera para mantenerlas a 4°C hasta su procesamiento i*n situ,* en donde

se realizaron diluciones seriadas en solución salina (0.08%); con 0.1 ml de cada dilución fueron inoculadas (por duplicado) cajas Petri conteniendo agar nutritivo, los cultivos se conservaron a temperatura ambiente y fueron transportados al laboratorio de Ecología Microbiana de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco para continuar con el procesamiento. A partir de los cultivos crecidos, se hicieron aislamientos de colonias al azar y se resembraron en agar nutritivo, después de 18 horas de incubación a 28°C, se aplicó la tinción de Gram para determinar su morfología celular, respuesta a esta tinción y su uniespecificidad (pureza). A los cultivos puros se les determinó su capacidad de producir enzimas extracelulares (lipasa, gelatinasa, ADNasa, amilasa, ureasa) y al polisacárido de Levan; fueron medios de cultivo sólidos específicos para determinar estas actividades, en todos los casos, se utilizaron cajas Petri, agua destilada, los medios de cultivo fueron esterilizados a 121 °C durante 15 minutos. Con excepción de la ureasa, los medios de cultivo fueron inoculados con asas de vidrio, utilizando cultivos en caldo nutritivo (4 h de incubación), las lecturas se realizaron después de 24 horas de incubación a 28 °C. La composición de los medios utilizados y cómo se realizaron las lecturas se describen a continuación

Amilasa: caldo nutritivo (8.0 g/L), agar bacteriológico (15.0 g/L), almidón soluble (1.5 g) y cloruro de sodio (5.0 g/L). Después de agregar Lugol (fórmula comercial), la presencia de un halo transparente alrededor del crecimiento (inóculo) indicó la producción de amilasa.

Gelatinasa: caldo nutritivo (8.0 g/L), agar bacteriológico (15.0 g/L) y gelatina bacteriológica (4.0 g/L) se añadió cloruro mercúrico (1 M) y un halo transparente alrededor del inóculo indicó la producción esta enzima.

ADNasa: agar para ADNasa, fórmula comercial (42.0 g/L). Después de la incubación, se adicionó ácido clorhídrico (HCl 1 N). La aparición de un halo transparente, alrededor del inóculo indicó la producción de la enzima

Lipasa: caldo nutritivo (8.0 g/L), agar bacteriológico (15.0 g/L), Tween 80 (10 mL/L). La producción de lipasa se evidenció por la formación de cristales alrededor del crecimiento bacteriano.

Ureasa: agar bacteriológico (15.0 g/L) y urea (29.0 g/L), esta última se esteriliza por filtración y se adiciona al agar tibio previamente esterilizado. El cambio de color en el medio de amarillo pálido a rosa intenso indicó la presencia de la enzima.

Polisacárido de Levan: caldo nutritivo (8.0 g/L), agar bacteriológico (15.0 g/L), sacarosa (40 mL/L). La producción de polisacárido se evidenció por el aspecto viscoso-mucoso en el crecimiento bacteriano

RESULTADOS

Se obtuvieron 52 cultivos bacterianos: 18 de AM, 22 de LC y 12 de All; en las figuras 2, 3 y 4, se presentan su morfología celular y respuesta a la tinción de Gram. En AM se observó la mayor diversidad morfológica, y mayor predominancia de cocobacilos Gram negativos (33%), en LC predominaron los cocos Gram positivos (41%) y en All los cocobacilos Gram negativos (58%).

Figura 2. Morfología celular y respuesta a la tinción de Gram positivo = Gram negativo = de los aislados bacterianos provenientes de Agua de Manantial (AM). C=Cocos, Ccb=cocobacilo, B=Bacilos, BE=Bacilos esporulados

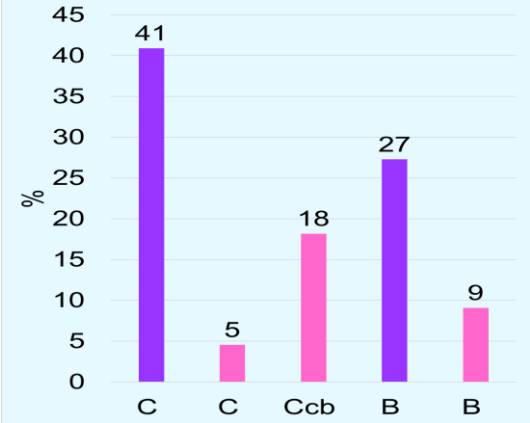


Figura 3. Morfología celular y respuesta a la tinción de Gram positivo = Gram negativo = de: Agua de La Concha (LC). C=cocos, Ccb=cocobacilo y B=bacilo

Figura 4. Morfología celular y respuesta a la tinción de Gram positivo = Gram negativo = de: Agua de la llave (All). A Ccb=cocobacilo, B=bacilo.

En las tablas 1, 2 y 3 se presentan la morfología celular de los aislados bacterianos su respuesta a la tinción de Gram, así como la producción de enzimas extracelulares. En el sitio All, la mayoría de los aislados, independientemente de la forma celular, produjeron lipasa; la gelatinasa en LC; en tanto que, en AM, se observó un coco Gram positivo (AM-4) con la capacidad de producir cinco enzimas extracelulares y cuatro de estas lo hicieron los cultivos AM-11 (coco Gram positivo), LC-2 (coco Gram positivo), LC-5 (coco Gram positivo), LC-6 (coco Gram positivo), LC-19 (cocobacilo Gram negativo) LC-20 (bacilo Gram negativo), LC-22 (coco bacilo Gram negativo).

La presencia de estas bacterias en el agua que se utiliza en Cuautepec podría poner en riesgo la salud de sus habitantes, por su capacidad de producir enzimas hidrolíticas que les confieren patogenicidad cabe señalar que aun cuando el agua de los tres sitios es utilizada para consumo y aseo personal, no recibe tratamiento alguno, por lo que la comunidad está expuesta continuamente a estos macroorganismos.

Tabla 1. Características celulares, capacidad de producir enzimas extracelulares por los cultivos bacterianos del sitio Agua de manantial (AM)

Cultivo	Forma celular	Gram	Lipasa	Gelatinasa	ADNasa	Amilasa	Ureasa	Polisácarido de Levan	No. de enzimas y polisacárido de Levan
AM-2	C	(+)	0	0	0	0	0	1	1
AM-3	C	(-)	1	0	1	0	0	0	2
AM-4	C	(+)	1	1	1	1	0	1	5
AM-5	B	(+)	0	1	0	1	0	1	3
AM-6	B	(-)	0	1	1	1	0	0	3
AM-7	C	(+)	1	0	0	0	0	0	1
AM-8	Ccb	(-)	1	0	1	0	0	0	2
AM-9	B	(-)	1	0	0	0	0	0	1
AM-11	Ccb	(+)	1	0	1	1	1	0	4
AM-12	Ccb	(-)	1	0	0	1	1	0	3
AM-14	B	(-)	0	0	0	1	0	1	2
AM-16	C	(-)	1	0	0	0	1	1	3
AM-17	Ccb	(-)	0	1	1	1	0	0	3
AM-18	Ccb	(-)	0	1	1	1	0	0	3
AM-19	BE	(+)	0	1	1	1	0	0	3

Gram positivo (+), Gram negativo (-), Azul claro ☐ =negativo a la producción de la enzima y polisacárido de Levan y azul fuerte ☐=positivo a la producción de la enzima

Tabla 2. Características celulares, capacidad de producir enzimas extracelulares por los cultivos bacterianos del sitio La Concha (LC)

Cultivo	Forma celular	Gram	Lipasa	Gelatinasa	ADNasa	Amilasa	Ureasa	Polisácarido de Levan	No. de enzimas y polisacárido de Levan
LC-1	C	(+)	0	1	0	0	1	1	3
LC-2	C	(+)	1	1	0	0	1	1	4
LC-3	C	(+)	0	0	1	1	0	0	2
LC-4	C	(+)	0	1	0	1	0	0	2
LC-5	C	(+)	1	1	1	1	0	0	4
LC-6	C	(+)	1	1	1	1	0	0	4
LC-7	C	(+)	0	0	0	1	0	0	1
LC-8	C	(+)	0	1	0	0	0	0	1
LC-9	C	(+)	0	1	0	0	1	0	2
LC-10	C	(-)	1	1	0	0	0	0	2
LC-11	B	(+)	0	1	0	0	0	0	1
LC-12	B	(+)	0	1	1	1	0	0	3
LC-13	B	(+)	0	1	1	1	0	0	3
LC-14	B	(+)	0	1	1	1	0	0	3
LC-15	B	(+)	0	1	1	1	0	0	3
LC-16	B	(-)	0	1	1	1	0	0	3
LC-17	Ccb	(-)	0	1	1	0	0	0	2
LC-18	Ccb	(-)	0	1	1	0	0	0	2
LC-19	Ccb	(-)	1	1	1	1	0	0	4
LC-20	B	(-)	1	1	0	1	0	1	4
LC-21	B	(+)	0	1	1	1	0	0	3
LC-22	Ccb	(-)	1	1	1	1	0	0	4

Gram positivo (+), Gram negativo (-), Azul claro =negativo a la producción de la enzima y polisacárido de Levan y azul fuerte =positivo a la producción de la enzima

Tabla 3. Características celulares, capacidad de producir enzimas extracelulares por los cultivos bacterianos del sitio Agua de la llave (All)

Cultivo	Forma celular	Gram	Lipasa	Gelatinasa	ADNasa	Amilasa	No. de enzimas y polisacárido de Levan
All-1	B	(+)	1	0	1	1	3
All-2	B	(+)	1	1	1	0	3
All-3	B	(-)	1	0	1	1	3
All-4	B	(-)	1	0	1	0	2
All-5	B	(-)	1	0	1	0	2
All-8	Ccb	(-)	0	0	1	0	1
All-10	Ccb	(-)	1	0	0	0	1
All-11	Ccb	(-)	1	0	1	0	2
All-14	Ccb	(-)	1	1	0	0	2
All-18	Ccb	(-)	1	1	0	0	2
All-20	Ccb	(-)	1	1	0	0	2

Gram positivo (+), Gram negativo (-), Azul claro ☐ =negativo a la producción de la enzima y polisacárido de Levan y azul fuerte ☐ =positivo a la producción de la enzima

CONCLUSIONES

Con base en los resultados se puede decir las bacterias aisladas de los tres sitios, presentan potencial patogénico al producir, la mayoría, más de tres enzimas y en algunos casos de cuatro a cinco de estas, además del polisacárido de Levan. Resaltando la importancia de analizar la calidad del agua para prevenir riesgos a la salud humana

AGRADECIMIENTOS

A la comunidad de Cuautepec, a la Sra. Justina Rosas Martín y al Sr. Erasto Vargas Santos, por las facilidades brindadas durante la recolección de muestras de agua y su procesamiento, por la atención y amabilidad con la que nos recibieron.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. F. MacFaddin, *Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias de importancia clínica*, Médica Panamericana, España, 3 era ,2003, pp. 161–257.
2. A. C. Sánchez, R. Parada, E. Marguet, y M. Vallejo, “Factores de virulencia, resistencia a los antimicrobianos y a metales pesados en *Enterococcus* spp. aislados de alimentos de origen animal”, Acta Bioquím. Clín. Latinoam., Vol. 55, 2, 2021, pp. 127–135.
3. O. N. Porres y E. R. Ruiz, *Microbiología clínica*, Ediciones Paraninfo, S.A., España, 2018, pp. 101.

4. A. E. Nikitkova, E. M. Haase, y F. A. Scannapieco, “Taking the starch out of oral biofilm formation: Molecular basis and functional significance of salivary α-amylase binding to oral streptococci”, Appl. Environ. Microbiol., Vol. 79, 2, 2013, pp. 416–423.
5. J. C. Rutherford, “The emerging role of urease as a general microbial virulence factor”, PLoS Pathog., Vol. 10, 5, 2014, e1004062.
6. E. Benigar, I. Dogsa, D. Stopar, A. Jamnik, I. K. Cigić, y M. Tomšič, “Structure and dynamics of a polysaccharide matrix: aqueous solutions of bacterial levan”, Langmuir, Vol. 30, 14, 2014, pp. 4172–4182.
7. M. T. Madigan, J. M. Martinko, y J. Parker, “Brock: Biología de los microorganismos”, Pearson Prentice Hall Iberia, 10ª ed., Madrid, 2003, pp. 593–600.
8. N. John, V. B. Vidyalakshmi, y A. M. Hatha, “Effect of pH and salinity on the production of extracellular virulence factors by *Aeromonas* from food sources”, J. Food Sci., Vol. 84, 8, 2019, pp. 2250–2255.
9. L. A. Salazar Carranza, M. M. Hinojoza Guerrero, M. P. Acosta Gaibor, A. F. Escobar Torres, y A. J. Scrich Vázquez, “Caracterización, clasificación y usos de las enzimas lipasas en la producción industrial”, *Rev. Cubana Investig. Bioméd.*, Vol. 39, 4, 2020, pp. 1-16
10. D. Lahiri, M. Nag, R. Banerjee, D. Mukherjee, S. Garai, T. Sarkar, et al., “Amylases: biofilm inducer or biofilm inhibitor?”, Front. Cell. Infect. Microbiol., Vol. 11, 2021, 660048.
11. H. E. C. Lendo Hernández, “Determinantes de virulencia (gelatinasa y citolisina) en *Enterococcus* spp. aislados de río y aguas residuales hospitalarias”, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma de Nayarit, México, 2017, pp. 83
12. A. Caraffini, C. Nobile, M. Figueroa, M. Vargas, y M. M. Tacchini, “Factores de virulencia de *Enterococcus* spp. y su relación con la resistencia a antibióticos”, Bioquím. Patol. Clín., Vol. 73, 3, 2009, pp. 34–39.
13. E. Cervantes-García, R. García-González, y P. M. Salazar-Schettino, “Características generales del *Staphylococcus aureus*”, Rev. Mex. Patol. Clín. Med. Lab., Vol. 61, 1, 2014, pp. 28–40.
14. F. Stehr, M. Kretschmar, C. Kröger, B. Hube, y W. Schäfer, “Microbial lipases as virulence factors”, J. Mol. Catal. B: Enzym., Vol. 22, 5–6, 2003, pp. 347–355.
15. B. Haas, L. Bonifait, K. Vaillancourt, S. J. Charette, M. Gottschalk, y D. Grenier, “Characterization of DNase activity and gene in *Streptococcus suis* and evidence for a role as virulence factor”, BMC Res. Notes, Vol. 7, 2014, pp. 1–8.
16. P. Sumby, K. D. Barbian, D. J. Gardner, A. R. Whitney, D. M. Welty, R. D. Long, et al., “Extracellular deoxyribonuclease made by group A *Streptococcus* assists pathogenesis by enhancing evasion of the innate immune response”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 102, 5, 2005, pp. 1679–1684.
17. D. L. Weeks, S. Eskandari, D. R. Scott, y G. Sachs, “A H+-gated urea channel: the link between *Helicobacter pylori* urease and gastric colonization”, Science, Vol. 287, 5452, 2000, pp. 482–485.
18. A. Dheyab, O. I. Aljumaili, y N. Hussein, “Study of virulence factors in urease-positive bacteria isolated from urinary tract infections clinical specimens”, J. Pure Appl. Microbiol., Vol. 12, 3, 2018, pp. 1465–1472.
19. D. H. Limoli, C. J. Jones, y D. J. Wozniak, “Bacterial extracellular polysaccharides in biofilm formation and function”, Microbiol. Spectr,2015,3, 2015, pp. 223–247.

CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES TOTALES Y GRADOS BRIX EN *Agave Cupreata* PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL EN GUERRERO

Abelardo Analco Hernández[1*], Kelly Maribel Monja Mio[2], Luz Elena Ramos Arellano[1], Javier Jiménez Hernández[1].

[1]Facultad Ciencias Químico Biológicas, Av. Lázaro Cárdenas, S/N. Ciudad Universitaria, Col. La Haciendita, C.P. 39090. [2]Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Calle 43 No 130, Chuburná de Hidalgo, 10 Mérida, Yucatán 97200, México.
14885@uagro.mx

RESUMEN

El contenido promedio de azúcares reductores totales (ART) que están presentes en el agave varía entre 20 y 30% en peso. Cuando un agave tiene un contenido de azúcares reductores del 20%, es considerado de baja calidad y si presenta entre el 25 y 30 % es de buena calidad, puesto que el alcohol obtenido en la fermentación depende de la cantidad de azúcares reductores, El índice refractométrico, sólidos solubles totales (SST) o grados Brix (ºBx) hace referencia al contenido de sacarosa (azúcar) presente en una disolución, el cual puede ser determinado de manera muy práctica y rápida, mediante el empleo de un refractómetro o con un hidrómetro. Este parámetro da una idea de la cantidad de azúcares que se encuentran presentes en 100 gramos de una disolución (Bautista Justo, Garcia Oropeza, et al., 2001). El objetivo de esta investigación fue evaluar los grados Brix y el porcentaje de azúcares reductores totales en *Agave cupreata* para la producción de mezcal en tres fábricas del estado de Guerrero. Se recolectaron 43 muestras de los diferentes puntos de madurez que presenta el *Agave cupreata* (velilla y capón), de 3 fábricas de la comunidad de Axaxacualco Guerrero, denominadas como fábrica 1 (con cosecha de agave dentro del ejido), fábricas 2 y 3 (con cosecha de agave fuera del ejido). Las muestras se transportaron al Laboratorio Nacional de Análisis del Mezcal de la Facultad de Ciencias Químicas Biológicas y se mantuvieron a 4°C hasta su análisis. De cada muestra recolectada se extrajeron 500 g de materia prima para su procesamiento. Se midió el volumen del jugo obtenido y se determinaron los grados Brix (ºBrix) con un refractómetro. La determinación de azúcares reductores totales (ART) se llevó a cabo con el método Lane-Eynon (colorimétrico). En nuestros resultados se observó que él %ART fue mayor en el agave cosechado dentro del ejido (25.3%) procesado en la fábrica 1, en comparación con el agave cosechado fuera del ejido (22.9%) procesados en las fábricas 2 y 3 (p=0.028). Así mismo, el porcentaje de %ART fue mayor cuando la cocción de las piñas de *Agave cupreata* fue suficiente (24.8% vs 21.3%, p= 0.003). De manera relevante, se encontró una alta correlación entre el % ART y los °Brix (r=0.38, p=0.010). No se observaron diferencias de los ºBrix entre las fábricas participantes ($p>0.05$), sin embargo, fueron mayores en el agave cosechado dentro del ejido (20.3 de °Brix, fábrica 1), comparado con el agave cosechado fuera del ejido procesados en las fábricas 2 y 3 (15.2 y 19.5 de °Brix, respectivamente). En conclusión, el % de ART y °Brix en el *Agave cupreata* se correlacionaron positivamente, lo cual puede favorecer la producción de alcohol en el proceso de fermentación para la producción de mezcal.

INTRODUCCIÓN

La palabra mezcal proviene del náhuatl mexcali "maguey horneado", de metl "maguey" e ixca "hornear". El mezcal es una bebida alcohólica mexicana destilada elaborada de manera artesanal a partir de los jugos fermentados de las cabezas de agave, que se caracteriza por ser un líquido incoloro o ligeramente amarillento cuando es reposado o añejado en recipientes de madera (barricas) de roble blanco o encino, o cuando se aboque sin reposarlo o añejarlo, además de que presenta un olor, y sabor sui géneris de acuerdo a su tipo (Rodríguez Cortez & de la Cerna Hernández, 2017; Ruiz Terán et al., 2019).

El mezcal es un producto protegido, ya que se produce exclusivamente en regiones dentro de la denominación de origen (Cuevas Reyes et al., 2019).
La composición química del mezcal es muy compleja, depende de diferentes factores, como la especie de agave, las condiciones climáticas en el sitio de cosecha, las condiciones de fermentación, los tipos de microorganismos presentes y el proceso de destilación. La composición química está relacionada con la presencia de compuestos volátiles que le confieren sabor y aroma característicos al mezcal. El etanol y el agua son los principales componentes del Mezcal, con fracciones volumétricas del primero que van del 35 al 55% Alc. Vol., además, el Mezcal tiene en pequeñas fracciones otros compuestos, tales como; metanol, ácido acético, acetato de etilo, alcoholes superiores, ésteres, cetonas, furanos, acetales, aldehídos, fenoles y terpenos, así como proteínas, estos pueden actuar como surfactantes (Martínez et al., 2019; Molina Guerrero et al., 2007; Rage et al., 2020).

El objetivo general de este trabajo fue, **"**Evaluar los grados brix y el porcentaje de azúcares reductores totales en *Agave cupreata* para la producción de mezcal en tres fábricas del estado de Guerrero".

TEORÍA

Generalidades del agave.

El Agave es una planta simbólica de México y se puede obtener de poblaciones naturales (silvestres) y/o de plantaciones establecidas. El género *Agave* es el más grande de nueve subgéneros de la familia *Asparagaceae*, con 210 especies, de las cuales 150 son endémicas de México; por lo tanto, se considera el centro de diversidad de estas plantas (Bermúdez Bazán et al., 2021).

Esta planta es considerada perenne, ya que utiliza el Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM), lo que le permite adaptarse a ecosistemas de clima árido. Los agaves se adaptan bien a las condiciones ambientales del territorio porque sus características morfológicas y fisiológicas les permiten soportar ambientes hostiles (Bermúdez Bazán et al., 2021).

Descripción del agave.

Los Agaves son plantas que por sus características fisiológicas pueden adaptarse a diversas condiciones agroecológicas o hábitats, por lo que pueden encontrarse en valles y planicies, así como en cerros y laderas pedregosas, incluso en zonas montañosas de gran altitud. morfológicamente los agaves tienen forma de piña (o ananá) de la cual salen sus hojas o pencas en roseta, a veces rectas y otras curvas o dobladas de manera caprichosa, gruesas y carnosas pero duras, de bordes espinosos, a veces de color amarillo, y con una púa en la punta (espina). su escapo floral (quiote) llega a medir hasta 12 metros según la especie. el color va desde el verde claro hasta el verde oscuro, pasando por varios tonos de azul (Plascencia de la torre & peralta Gordon, 2018; r. Kirchmayr et al., 2014).

Distribución del agave.

El género *agave* se distribuye de manera natural en américa. esta distribución abarca del sur de los estados unidos hasta Colombia y Venezuela. en donde, los países con el mayor número de taxones son México, estados unidos, cuba y Guatemala; los demás tienen menos de 8 especies (menos del 3 % del total). México es conocido como el centro de origen y biodiversidad de este género, ya que cuenta con el 76% de las diversas especies, gracias a su ubicación geográfica y a las condiciones ambientales. este género lo componen aproximadamente 210 especies y 150 se encuentran en el país, sin embargo, ésta es altamente asimétrica, puesto que hay regiones que poseen más especies que otras. entre los estados con mayor diversidad se encuentra Oaxaca, puebla, Sonora, Querétaro y Durango (Chávez Parga et al., 2016; Martínez et al., 2019).

los agaves son muy diversos en las provincias áridas y semiáridas del centro y norte, pero su número disminuye drásticamente hacía las provincias húmedas y cálidas del sur, por lo que su ausencia es notoria en estados como tabasco, campeche y quintana roo. estos son abundantes en las provincias

florísticas de las serranías meridionales del centro de México, sierra madre occidental, altiplano mexicano, península de baja california y sierra madre oriental (Chávez Parga et al., 2016; Martínez et al., 2019).
Agave: es el nombre de un género de plantas monocotiledóneas que comprende unas 210 especies pertenecientes al orden asparagales, familia *Asparagaceae, subfamilia Agavoideae* (tabla 1), de las cuales 150 se encuentran en México. El nombre "Agave" proviene del griego "admirable" o "noble", el cual fue acuñado por el naturalista sueco Carl von Linneo en su obra *Species Plantarum* en 1753 (Gallardo Valdez, 2016).

Azucares reductores totales (ART) en agave.

En los agaves, los fructanos (polímeros de fructosa) constituyen los principales carbohidratos de reserva. Estos polímeros sólo contienen un residuo de glucosa en el extremo reductor de la molécula y el contenido de fructosa varía de acuerdo a su grado de polimerización promedio. Son sintetizados a partir de sacarosa y se clasifican como inulinas o levanas. La inulina presente en el agave, se degrada durante el cocimiento dando principalmente varias moléculas de fructosa. La fructosa y glucosa presentes en el agave son dos azúcares reductores muy importantes para la producción de mezcal ya que son utilizados por las levaduras para la obtención del etanol y de los compuestos que proveen las características sensoriales del producto (Bautista Justo, García Oropeza, et al., 2001; Zamora et al., 2010).

El contenido promedio de azúcares reductores totales (ART) que están presentes en el agave, varían entre 20 y 30% en peso. Cuando un agave tiene un contenido de azúcares reductores del 20%, es considerado de baja calidad y si presenta entre el 25 y 30% es de buena calidad, puesto que el alcohol obtenido en la fermentación depende de la cantidad de azucares reductores (Bautista Justo, García Oropeza, et al., 2001).

Grados Brix

El índice refractométrico, sólidos solubles totales (SST) o grados Brix (ºBx) hace referencia al contenido de sacarosa (azúcar) presente en una disolución y que puede ser determinado de manera muy práctica y rápida mediante el empleo de un refractómetro o con un hidrómetro. Este parámetro da una idea de la cantidad azúcares que se encuentran presentes en 100 gramos de una disolución, es decir la concentración porcentual de la misma (%m/m) (Bautista-Justo *et al.,* 2001; Barbagelata *et al*., 2019).

PARTE EXPERIMENTAL

Origen de la muestra: Se recolectaron 43 muestras de *A. cupreata* de 3 fábricas de la localidad de Axaxacualco, Guerrero. Las muestras fueron recolectadas de los diferentes puntos de madurez que presenta el agave (velilla y capón) para poder realizar la comparación en el proceso de investigación.
Transporte de la muestra: Las muestras se transportaron en una hilera conservándola fría al Laboratorio Nacional de Análisis del Mezcal de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Guerrero debidamente etiquetadas correctamente para su identificación.
Procesamiento de la muestra: Una vez que llegaron las muestras al laboratorio se mantuvieron en refrigeración a 4°C hasta su análisis. De las muestras recolectadas se pesaron 500 g, las cuales se lavaron previamente con agua potable para retirar residuos inservibles y después se llevó a cabo la extracción del jugo con un extractor de jugos marca turmix. El jugo obtenido se midió y se determinó sus grados Brix con un refractómetro, luego se colocaron en recipientes estériles y se dejó en refrigeración a -17 ºC.

Para la determinación de azúcares reductores totales (ART) en agave se empleó el método Lane-Eynon como lo indica el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal A.C.

RESULTADOS

En nuestros resultados se observó que el %ART fue mayor en el agave cosechado dentro del ejido (25.3%) procesado en la fábrica 1, en comparación con el agave cosechado fuera del ejido (22.9%) procesados en las fábricas 2 y 3 (p=0.028). Asi mismo, el porcentaje de %ART fue mayor cuando la cocción de las piñas de *Agave cupreata* fue suficiente (24.8% vs 21.3%, p= 0.003). De manera relevante, se encontró una alta correlación entre el % ART y los °Brix (r=0.38, p=0.010) figura 3. No se observaron diferencias de los ºBrix entre las fábricas participantes (p>0.05), sin embargo, fueron mayores en el agave cosechado dentro del ejido (20.3 de °Brix, fábrica 1), comparado con el agave cosechado fuera del ejido procesados en las fábricas 2 y 3 (15.2 y 19.5 de °Brix, respectivamente) figura 2.

Tabla *1*. Porcentajes de ART y ºBrix de acuerdo con algunas variables.

Variables	%ART	Valor de *p*	ºBrix	Valor de *p*
Procedencia del agave		**0.028***		0.136
Ejidal	25.3		20.3	
No ejidal	22.9		17.7	
Cocción de las piñas		**0.003***		0.094
Suficiente	24.8		20.0	
Insuficiente	21.3		15.2	
Tiempo de almacenamiento de las piñas cocidas		**0.028***		0.136
≤ 3días	22.9		17.7	
>3 días	25.3		20.3	

Los datos muestran medias y valores de *p* por *t-student.*
*valor estadísticamente significativa.

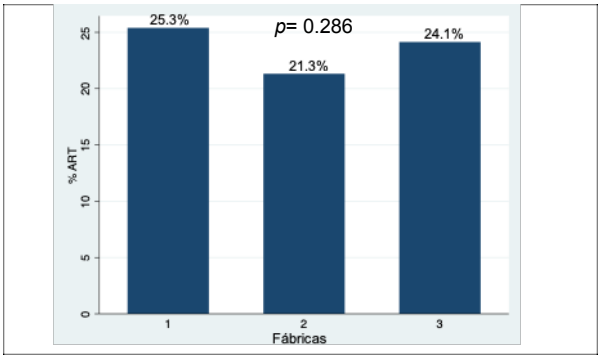


Figura 1. Medias del % de ART obtenidos por las fábricas estudiadas. Valor de p por ANOVA.

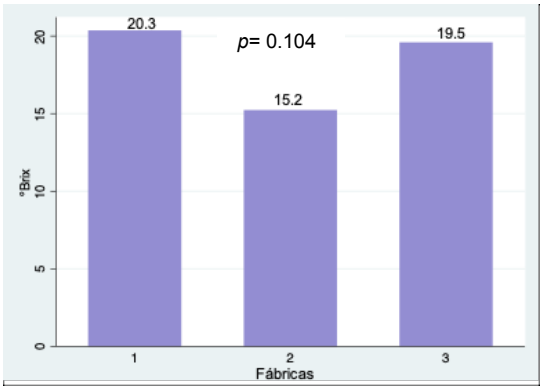


Figura 2. Media de ºBrix por fábricas de estudio. Valor de p por ANOVA.

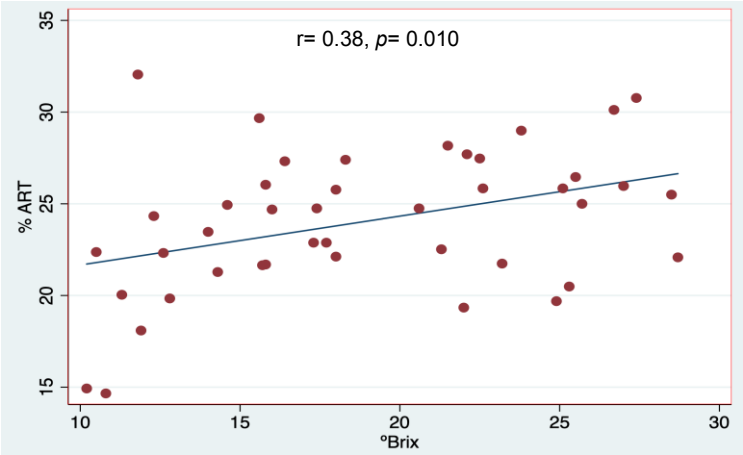


Figura 3. Coeficiente de correlación de Pearson del % de ART con los niveles de ºBrix.

CONCLUSION

El % de ART y °Brix en el *Agave cupreata* se correlacionaron positivamente, lo cual puede favorecer la producción de alcohol en el proceso de fermentación para la producción de mezcal. Se sugiere realizar un muestreo en el periodo de marzo - junio para comparar los resultados obtenidos en esta investigación, ya que en este periodo es el óptimo para la producción de mezcal.

BIBLIOGRAFÍA

1. Avendaño Arrazate, C., Iracheta Donjuan, L., Gódinez Aguilar, J. C., López Gómez, P., & Barrios Ayala, A. (2015). Caracterización morfológica de Agave cupreata, especie endémica de México. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 148–162.
2. Bautista Justo, M., García Oropeza, L., Salcedo Hernández, R., & Parra Negrete, L. A. (2001). *ART AGAVE TEQUILANA*. *11*, 33–38.
3. Bermúdez Bazán, M., Castillo Herrera, G. A., Urías Silvas, J. E., Escobedo Reyes, A., & Estarrón Espinosa, M. (2021). Hunting bioactive molecules from the agave genus: An update on extraction and biological potential. In *Moléculas* (Vol. 26, Issue 22). MDPI. https://doi.org/10.3390/molecules26226789.
4. Chávez Parga, Ma. D. C., Pérez Hernández, E., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *18*(1). https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552.
5. Cuevas Reyes, V., Sánchez Toledano, B. I., Borja Bravo, M., Espejel García, A., Sosa Montes, M., Barrera Rodríguez, A. I., & Jorge Saavedra García, M. (2019). Characterization of maguey production in the District of Miahuatlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *10* (2), 365–377.
6. Gallardo Valdez, J. (2016). *BREVIARIO BREVIARIO MEZCALERO MEZCALERO REGIONALISMOS Y TÉRMINOS COMUNES, ANTIGUOS Y CONTEMPORÁNEOS DEL PROCESO DE LA ELABORACIÓN DEL MEZCAL*.
7. Martínez, S., Nuñez Guerrero, M., Gurrola Reyes, J. N., Rutiaga Quiñones, O. M., Paredes Ortíz, A., Soto Oscar N., Flores Gallegos, A. C., & Rodríguez Herrera, R. (2019). Mescal an alcoholic beverage from Agave spp. with great commercial potential. In *Alcoholic Beverages: Volume 7: The Science of Beverages* (pp. 113–140). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815269-0.00004-0.
8. Molina Guerrero, J. A., Botello Álvarez, J. E., Estrada Baltazar, A., Navarrete Bolaños, J. L., Jiménez Islas, H., Cárdenas Manríquez, M., & Rico Martínez, R. (2007). COMPUESTOS

VOLÁTILES EN EL MEZCAL. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *6*(1), 41–50. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62060106.

9. Plascencia de la Torre, M. F., & Peralta Gordon, L. M. (2018). Análisis histórico de los mezcales y su situación actual desde una perspectiva ecomarxista/ Historical analysis of mezcals and their current situation from an eco-marxist approach. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, *14*, 23–42. https://doi.org/10.17141/eutopia.14.2018.3579.
10. . Kirchmayr, Arellano Plaza Melchor, Estarrón Espinoza Mirna, & Gschaedler Mathis Anne Christine. (2014). *Manual mezcal guerrerense CIATEJ*.
11. Rage, G., Hernández Sánchez, W., Scheid, H., Legendre, D., & Zenit, R. (2020). *Bubbles determine the amount of alcohol in Mezcal*.
12. Rodríguez Cortez, A., & de la Cerna Hernández, C. (2017). El mezcal, su producción su tratamiento de residuos. *Alianzas y Tendencias BUAP*, *2*(8), 10–14.
13. Ruiz Terán, F., Martínez Zepeda, P. N., Geyer de la Merced, S. Y., Nolasco Cancino, H., & Santiago Urbina, J. A. (2019). Mezcal: indigenous Saccharomyces cerevisiae strains and their potential as starter cultures. *Food Science and Biotechnology*, *28* (2), 459–467. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0490-2.
14. Salinas, S., Mariles-Flores, V., Alberto Ortiz-Solorio, C., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Sánchez-Guzmán, P., & Ángel Cano-García, M. (2016). Las clases de tierras productoras de magueye mezcalero en la soledad salina, Oaxaca. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 7).

EXTRACCIÓN, BIOACCESIBILIDAD Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE HONGO AZUL (*Lactarius Indigo*) DURANTE LA DIGESTIÓN IN VITRO

Stephany Alvarado-Velásquez[1,2], Marlenne Y. Lima-Silva[1,2], Orlando Arellano-Castillo[3], Armando J. Martínez-Chacón[4], Elvia Cruz-Huerta[1]

[1] Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, 91193, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México, [2] Facultad de Nutrición, Universidad Veracruzana Médicos y Odontólogos s/n, Unidad del Bosque, 91017 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. [3] Doctorado en Ciencias Biomédicas, Universidad Veracruzana. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, 91193, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. [4] Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, 91193, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.
alvaradofany7113@gmail.com

RESUMEN

Los hongos comestibles silvestres desempeñan un papel fundamental en la dieta y en la medicina tradicional de diversas comunidades a nivel mundial. En México, así como en otras regiones de América Central y del Norte, la amplia diversidad de macrohongos incluye numerosas especies cuya composición química y propiedades benéficas para la salud requieren una investigación más exhaustiva. En particular, *Lactarius indigo* (Schwein.) Fr., conocido como hongo azul o níscalo índigo, ha despertado especial interés debido a su intenso color azul índigo, su sabor distintivo y su potencial valor nutracéutico. El presente estudio tuvo como objetivo optimizar el proceso de extracción de compuestos fenólicos de *L. Indigo* y evaluar su bioaccesibilidad y actividad antioxidante durante la digestión in vitro. Se analizaron muestras de *L. Indigo* en estado crudo y sometidas a un tratamiento térmico (asado durante 5 minutos) para simular las condiciones tradicionales de consumo. Posteriormente, las muestras fueron liofilizadas y pulverizadas. La optimización de la extracción se realizó utilizando distintos solventes (etanol y metanol), tiempo de agitación (10 y 30 minutos) y procesos (centrifugación y baño ultrasónico). Las condiciones de extracción se evaluaron en función del rendimiento de compuestos fenólicos totales (CFT) por el método de Folin-Ciocalteu y de la actividad antioxidante, determinada mediante los ensayos ABTS y DPPH. Además, las muestras de hongos asados se sometieron a un proceso de digestión gastrointestinal simulada de acuerdo con el protocolo INFOGEST, que incluye las fases oral, gástrica e intestinal. Entre las condiciones evaluadas, la extracción realizada con etanol/agua (70:30 v/v) y 10 minutos de agitación mostró una mayor actividad antioxidante, estableciéndose como la condición óptima en términos de rendimiento y eficacia. Las muestras de hongos asados presentaron un incremento en el contenido de CFT del 95.92% en comparación con las muestras de hongos crudos, lo que sugiere que la cocción facilita la ruptura de las estructuras celulares y favorece la liberación de compuestos bioactivos. Tras la digestión gastrointestinal simulada, se obtuvo una bioaccesibilidad de CFT del 49.64%. Además, la mayor actividad antioxidante en los digeridos se observó en la fase intestinal, con un 83.53 % de inhibición en el ensayo ABTS y un 66.88 % en el ensayo DPPH. Por lo tanto, *L. indigo* representa un recurso valioso como fuente de compuestos bioactivos que tras su consumo exhibe una alta bioaccesibilidad de compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes, lo que podría contribuir a prevenir enfermedades asociadas al estrés oxidativo y a mejorar el estado nutricional. Es necesario profundizar en la investigación y desarrollar estrategias de recolección sostenibles para considerar su aplicación en la formulación de alimentos funcionales y nutracéuticos.

INTRODUCCIÓN

Hongos, capacidad antioxidante y su relación con la salud

Los hongos tienen una gran importancia dentro de los ecosistemas donde habitan debido a que son un elemento biológico fundamental que mantiene una interacción cercana con plantas, animales y otros microorganismos del medio. Uno de sus aportes más destacables es su participación en la

formación de micorrizas, las cuales permiten una mayor absorción de nutrientes hacia las plantas de forma natural mediante la asociación simbiótica con los hongos. Aunado a su importancia a nivel ecológico, algunos de estos cuerpos fructíferos han sido utilizados para consumo humano desde épocas prehispánicas, prevaleciendo como un alimento tradicional que representa una fuente natural de compuestos bioactivos con potencial terapéutico y nutricional (Colak et al., 2009; Pérez et al., 2009; Cepero de García et al., 2012).

En el centro y sureste de México, la recolección, comercialización y consumo de hongos ha sido una tradición bastante arraigada. Se ha estimado que existen cerca de 185,000 especies en el país; sin embargo, solo una pequeña parte ha sido investigada acerca de su composición química, su contribución en la dieta y sus efectos en la salud humana. La variabilidad en la composición química entre especies responde a factores geográficos, ambientales y de procesamiento culinario, lo que puede modificar significativamente su perfil de compuestos bioactivos.

Entre los metabolitos de interés presentes en los hongos comestibles se encuentran polisacáridos, proteínas, péptidos, proteoglucanos, terpenos, lectinas y, especialmente, compuestos fenólicos. Estos últimos han sido ampliamente reconocidos por su capacidad antioxidante, implicada en la prevención de patologías crónicas asociadas al estrés oxidativo.

La bioactividad de los compuestos fenólicos no depende exclusivamente de su concentración inicial, sino también de su bioaccesibilidad y biotransformación durante la digestión gastrointestinal. En este sentido, los modelos de digestión gastrointestinal in vitro, como el protocolo estandarizado INFOGEST, ofrecen una herramienta útil para simular condiciones fisiológicas y evaluar la estabilidad y liberación de estos compuestos en el tracto gastrointestinal (Jiménez-Ruiz et al., 2013; Gutiérrez-Grijalva et al., 2016; González-Morales, 2022; Nardini, 2022).

Además, la eficiencia en la extracción de compuestos fenólicos está influenciada por el tipo de solvente, el tiempo de extracción, la temperatura y el uso de tecnologías auxiliares. Asimismo, la evaluación de la capacidad antioxidante mediante ensayos químicos como DPPH y ABTS permite establecer correlaciones cuantitativas entre el contenido fenólico y su funcionalidad bioquímica. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo optimizar las condiciones de extracción para maximizar el rendimiento de compuestos fenólicos a partir del hongo *Lactarius indigo* y evaluar su bioaccesibilidad y actividad antioxidante tras la digestión gastrointestinal in vitro.

TEORÍA

Hongo azul (*Lactarius indigo*)

El género de hongos Lactarius (Russulacae) es uno de los géneros más amplios dentro de los hongos filamentosos compuestos por hifas. Este género incluye especies disponibles en diferentes sitios del mundo ubicados principalmente en bosques deciduos, dentro de los cuales forman micorrizas que además de ayudar al mantenimiento de los ecosistemas enriquecen su contenido nutrimental. Una de las características por las que los hongos pertenecientes al género Lactarius son reconocidos es por secretar un liquido lechoso al ser manipulados. Sin embargo, se debe destacar que dentro de los clasificados como especies comestibles destacan el *Lactarius sanguifluus*, *lactarius deliciosus*, y *lactarius indigo* (Kostic et al., 2023; Ochoa-Zarzosa et al., 2011; Verde et al., 2015). Este último, conocido también como “corneta azul”, “hongo añil” u “hongo de tinta”, se encuentra distribuido por Asia y partes centrales de América, destacando México como uno de los principales países en los que se puede encontrar a la venta en mercados locales como un ingrediente tradicional y gourmet.

Lactarius indigo se caracteriza por un sombrero azul con superficie lisa, una leve hendidura central y un estípite (pie) del mismo color, frecuentemente perforado por pequeños poros de tonalidad azul oscuro. Tras la cocción, el hongo adquiere una textura y sabor agradables, haciéndolo apto para el consumo humano. No obstante, su valor va más allá del interés culinario: recientes estudios han explorado su actividad antimicrobiana y citotóxica (López-Sánchez, 2022; Elkhateeb & Daba, 2021),

propiedades atribuidas en parte a la presencia de azuleno, un pigmento sesquiterpénico responsable de su distintiva coloración. El azuleno y sus derivados han demostrado un amplio espectro de actividades biológicas, destacando su acción antiinflamatoria a través de la inhibición selectiva de la ciclooxigenasa-2 (COX-2), sin inducir los efectos adversos gastrointestinales típicamente asociados a antiinflamatorios no esteroideos (Bakun et al., 2021). Además, estos compuestos exhiben propiedades antioxidantes mediante la neutralización de radicales libres, regulación de enzimas clave del metabolismo oxidativo e interferencia en rutas de señalización proinflamatorias (Paweł et al., 2021; Khan et al., 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención de las muestras

Las muestras frescas del hongo *Lactarius indigo* fueron recolectadas en las comunidades boscosas de Altotonga, Veracruz, México (19°46′39″N 97°06′50″O, 19.7775, -97.1138). Una parte de la muestra fresca se sometió a cocción (asado por 10 minutos) mientras que la otra se liofilizó sin someterse a ningún proceso térmico. Ambas se pulverizaron y se almacenaron al vacío a -80°C hasta su uso.

Optimización del proceso de extracción de compuestos fenólicos

Se realizaron diversas extracciones del hongo *Lactarius indigo* (crudo) previamente liofilizado y pulverizado. En una primera etapa se utilizó una dilución: 1:50 (p/v) en metanol/agua (80:20 v/v) y etanol/agua (70:30 v/v), agitándose a 400 rpm durante 10 minutos a temperatura ambiente y siendo centrifugadas a 16,000 rpm por 10 minutos. En la segunda etapa se realizaron las disoluciones de metanol y etanol a la misma proporción, pero aumentando el tiempo de agitación hasta 30 minutos y siendo sometidas a las mismas condiciones de centrifugado. Para la tercera etapa, utilizando los mismos solventes, a la misma proporción, se mantuvieron en agitación durante 10 minutos para luego pasar a un baño ultrasónico (CIVEQ Modelo 8892) a 40 Khz y 40°C durante 60 minutos. Posteriormente, estos extractos fueron centrifugados a 4,000 rpm durante 10 minutos. Finalmente, todas las muestras fueron filtradas para poder evaluar su contenido de compuestos fenólicos totales utilizando el método de Folin-Ciocalteu, así como su actividad antioxidante por los métodos DPPH y ABTS (Figura 1).

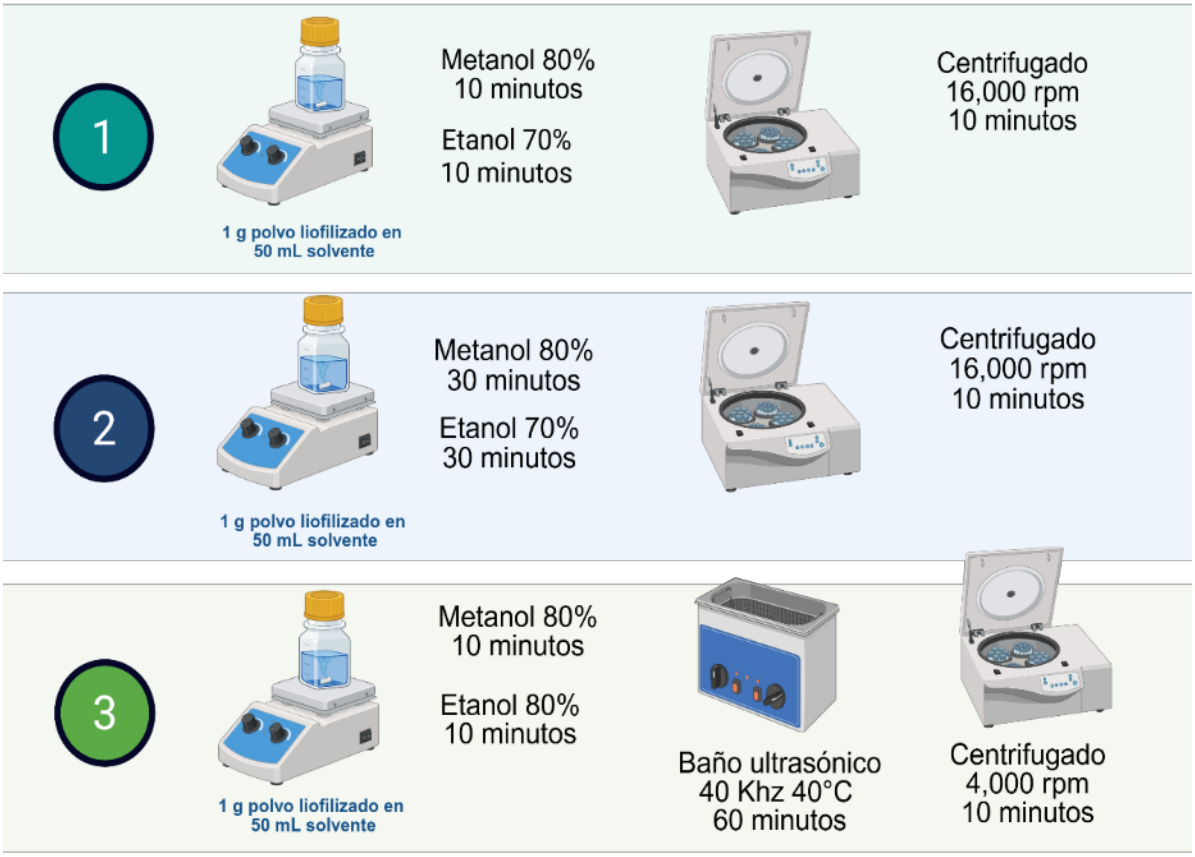


Figura 1. Optimización de la extracción de compuestos fenólicos y actividad antioxidante del hongo azul (*Lactarius indigo*) Creado en BioRender. Cruz Huerta, E. (2025) https://BioRender.com/ybupm6t "

Digestión in vitro

Los hongos previamente asados y liofilizados fueron sometidos a digestión in vitro de acuerdo al protocolo INFOGEST (Brodkorb et al., 2019) que incluye las fases: oral, gástrica e intestinal (Figura 2). Los reactivos y enzimas utilizados en este proceso son los establecidos en su protocolo. Para la fase oral se diluyó el polvo liofilizado previamente cocido (asado) en una proporción 1:1 (p/v) con simulación de fluido salival (SSF), se ajustó el pH a 7, se añadió la enzima α-amilasa salival humana y $CaCl_2$. La mezcla se incubó a 37°C con agitación a 150 rpm y pH 7 durante 2 minutos. En la fase gástrica el bolo oral se mezcló con fluido gástrico simulado (SGF) en una proporción (1:1, v/v), se agregó $CaCl_2$ y se ajustó a pH 3 con HCl, se agregó la pepsina y se incubó a 37°C con agitación a 150 rpm y pH 3 durante 2 horas. El quimo gástrico se diluyó en una proporción 1:1 (v/v) con fluido intestinal simulado (FIS), se ajustó a pH 7, se agregó bilis porcina y pancreatina, se incubó a 37 °C con agitación a 150 rpm durante 2 horas. Para inactivar la reacción enzimática se agregó Pefabloc® SC. Finalmente, todos los digeridos se centrifugaron a 16,000 g durante 10 minutos y 4 °C, se liofilizaron y almacenaron a -80 °C hasta su uso.

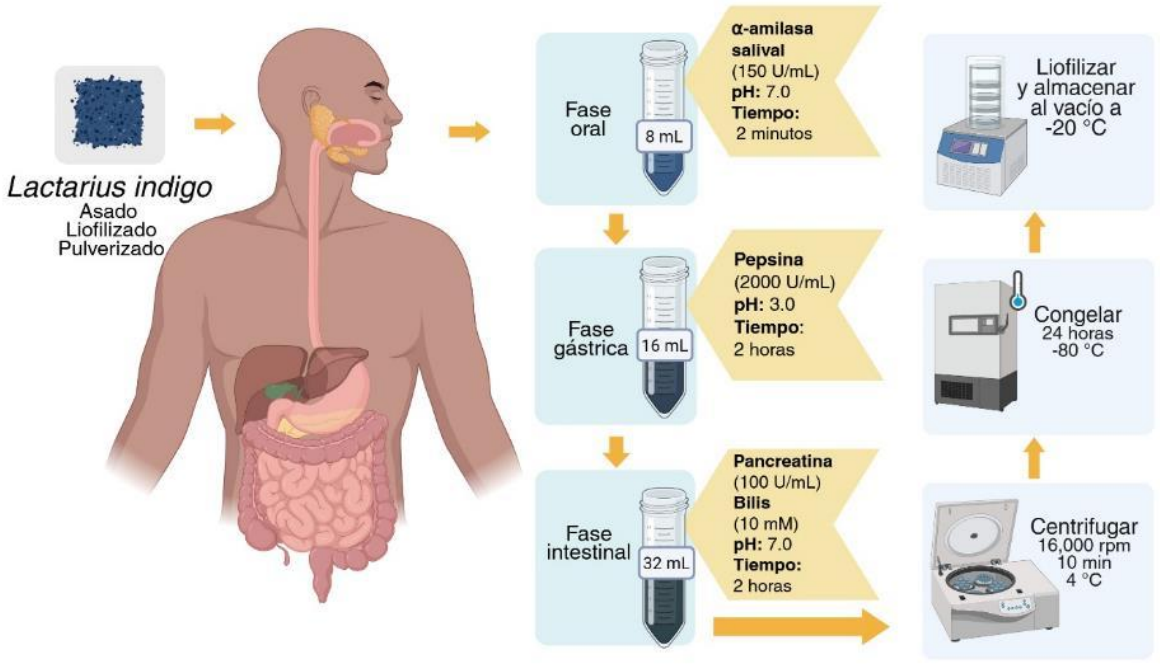


Figura 2. Digestión *in vitro* por el método INFOGEST en el hongo *Lactarius indigo.* Created in BioRender. Cruz Huerta, E. (2025) https://BioRender.com/l8u8ppo

Cuantificación de compuestos fenólicos totales

Se realizó el método de Folin-Ciocalteu de acuerdo con el protocolo descrito por Espinosa Leal et al. (2015) con algunas modificaciones. Se preparó una curva patrón de ácido gálico (Sigma-Aldrich, Alemania) a partir de 1 mg de ácido gálico en 5 mL de agua destilada. Posteriormente se añadieron 20 µL de la muestra a diferentes concentraciones en una placa de 96 pocillos. Se añadieron 100 µL de reactivo Folin-Ciocalteu 1 N, se dejó reposar durante 5 minutos y se añadieron 80 µL de una solución de carbonato sódico al 7.5%. Finalmente se incubaron a 37 °C durante 90 minutos y se leyó a 765 nm en un espectrofotómetro de placa Multiskan GO Thermo Scientific. Los resultados se expresan como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo (mg EAG g^{-1})

Determinación de la actividad antioxidante por ABTS

El ensayo de actividad de eliminación de radicales 2,2'- azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfonato (ABTS) se realizó de acuerdo con el método descrito por Re et al. (1999), con algunas modificaciones. Para la realización de una curva estándar se utilizaron 2 mg de Trolox diluidos en 10 mL de PBS. El radical ABTS•+ se obtuvo tras disolverlo en una solución de persulfato potásico 2.45 mM hasta una concentración final de 7 mM. Se dejó reposar en la oscuridad y a temperatura ambiente 16 horas antes de su utilización. Luego se diluyó con PBS y se leyó a 734 nm en un espectrofotómetro de placa (Multiskan GO Thermo Scientific, Vantaa, Finlandia) hasta alcanzar una absorbancia comprendida entre 0.650 y 0.750. Los resultados obtenidos se expresan como porcentaje de inhibición del radical ABTS (% inhibición).

Determinación de la actividad antioxidante por DPPH

Para la evaluación de la capacidad de las muestras ante la eliminación de radicales 2,2-difenil-1-picril-hidrazil-hidrato (DPPH) se utilizó el protocolo descrito por Brand-Williams (1995) con algunas modificaciones. Se preparó una curva estándar de Trolox a partir de 2 mg en 10 mL de metanol al 80%. Se disolvieron 2 mg del radical DPPH en 50 mL de metanol al 80%. En la placa de 96 pocillos, se agregaron 100 µL de la muestra en diferentes concentraciones y 100 µL de DPPH, para llevarse a incubar durante 30 minutos a temperatura ambiente. Finalmente se leyó la absorbancia a una

longitud de onda de 517 nm en un espectrofotómetro de placa (Multiskan GO Thermo Scientific). Los resultados obtenidos se expresan como el porcentaje de inhibición del radical DPPH (% inhibición).

RESULTADOS

El primer objetivo fue encontrar la óptima relación entre el solvente, el tiempo de extracción y la cantidad de compuestos fenólicos totales, así como la capacidad antioxidante realizada por el método ABTS. La Figura 3 muestra el contenido fenólico total obtenido mediante las diferentes condiciones de extracción aplicadas. Incluye las extracciones con etanol (EtOH) y metanol (MeOH) a diferentes tiempos (10 y 30 minutos), así como extracciones por baño ultrasónico (BU) con ambos solventes. Se observó que el EtOH de 10 y el de 30 minutos presentaron la mayor cantidad de compuestos fenólicos (2.971 mg EAG g^{-1} y 3.211 mg EAG g^{-1} respectivamente) sin existir diferencia significativa entre ellos (p=0.99). Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Espejel-Sánchez et al. (2019) quienes evaluaron la cantidad de CFT en cinco especies de hongos comestibles, entre ellos la especie *Lactarius indigo*; en su estudio utilizaron como solvente de extracción metanol/agua (80:20 v/v) y encontraron 2.92 mg EAG g^{-1} .

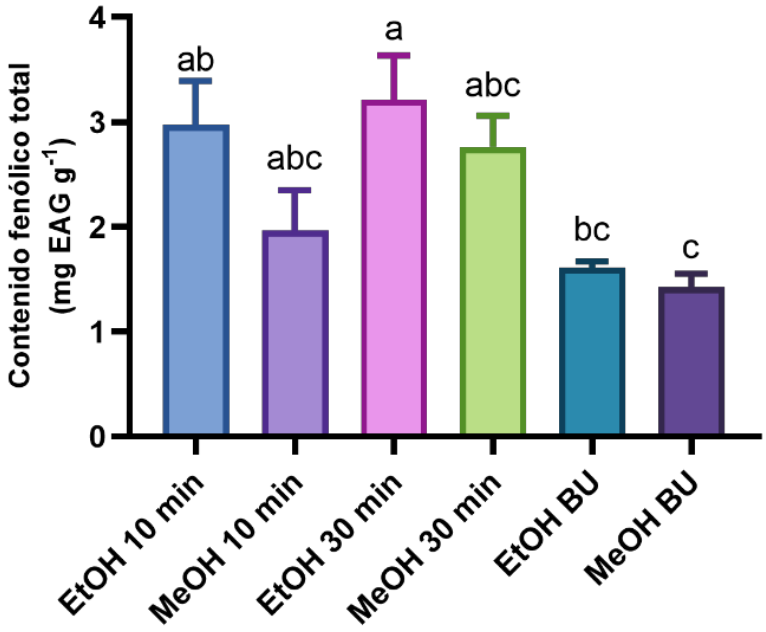


Figura 3. Contenido de fenoles totales (mg EAG g^{-1}) en extractos crudos de *Lactarius indigo* obtenidos con etanol (EtOH) y metanol (MeOH) mediante tres tratamientos de extracción: 10 min, 30 min y con baño ultrasónico (BU). Las barras representan la media ± desviación estándar (n=4). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

El análisis estadístico mediante comparaciones múltiples de Tukey permitió identificar diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las extracciones de EtOH 10 minutos y MeOH BU, así como del EtOH 30 min respecto al EtOH BU y MeOH BU. Por esto, el etanol parece ser más eficiente que el metanol para la extracción de compuestos fenólicos. A su vez, el tiempo de extracción (30 minutos) mejoró los resultados en comparación con tiempos más cortos (10 min), mientras que el tratamiento con baño ultrasónico no mejoró la extracción de estos compuestos.
En la Figura 4 se muestra el ensayo de inhibición del radical ABTS bajo estas mismas condiciones de extracción. Se puede observar que los extractos tanto etanólicos como metanólicos sometidos a agitación por 10 minutos presentan los valores más altos de inhibición del radical ABTS, sin tener

diferencias significativas entre ellos (89.73%). Esto podría indicar que los periodos cortos de extracción serían suficientes para obtener compuestos de gran capacidad antioxidante independientemente de cuál de estos dos solventes se utilice.

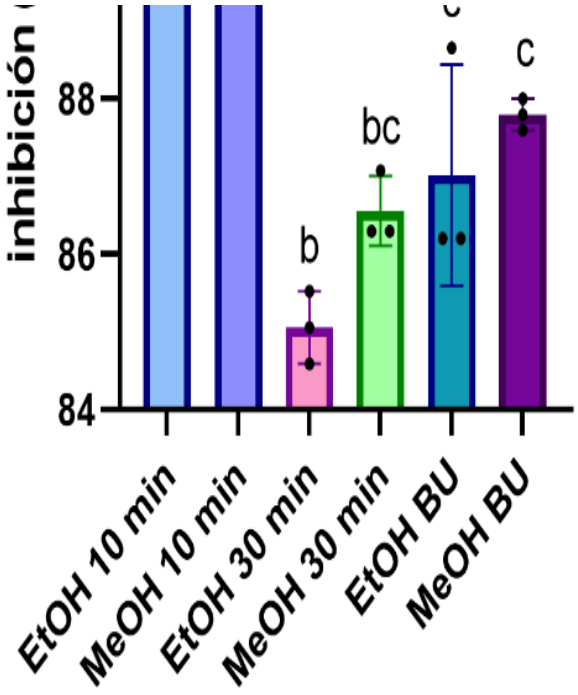


Figura 4. Porcentaje de inhibición del radical ABTS en extractos crudos de *Lactarius indigo* obtenidos con etanol (EtOH) o metanol (MeOH) mediante tres tratamientos de extracción: agitación 10 min, agitación 30 min y baño ultrasónico (BU). Los resultados se presentan como media ± desviación estándar (n = 4). Letras distintas indican diferencias signifcativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Además, el extracto de etanol durante 30 minutos mostró la menor actividad antioxidante, siendo significativamente inferior a los demás tratamientos (85.05%), a excepción del extracto de metanólico también de 30 minutos (86.56%). Respecto al extracto etanólico y metanólico sometidos al baño ultrasónico, los solventes mostraron una capacidad antioxidante del 87.02% y 87.80% respectivamente, con diferencias estadísticamente significativas en comparación con los extractos de 10 minutos. Por todo lo anterior se puede inferir que los tiempos de extracción más largos podrían disminuir la capacidad de neutralizar radicales libres ABTS, esto a causa de la oxidación o degradación parcial de los compuestos fenólicos. Este hallazgo resulta interesante, ya que, aunque el ultrasonido se ha mencionado como una técnica para mejorar la extracción de compuestos bioactivos (Xu et al., 2020), en este estudio no se notaron beneficios claros en la actividad antioxidante, lo cual podría deberse a una posible degradación de compuestos sensibles a la cavitación y calor provocado por el tratamiento ultrasónico.

Finalmente se analizó el contenido fenólico total (Figura 5), así como la actividad antioxidante (Figura 6) del extracto del hongo crudo (“Crudo”), el extracto del hongo asado (“Asado”) y la digestión intestinal *in vitro* (“Intestinal”), mostrando al extracto del hongo asado con el contenido de compuestos fenólicos significativamente más alto en comparación con el crudo e intestinal (5.821 mg EAG g^{-1}). Por otro lado, el hongo sometido a digestión intestinal mostró una tendencia decreciente siendo estadísticamente similar al crudo (2.890 mg EAG g^{-1}). Estos valores son inferiores a los reportados por Kosanić et al. (2022) para otras especies del género *Lactarius*, en las cuales se alcanzaron concentraciones superiores a 8 mg EAG g^{-1}. Esta diferencia podría deberse a

las diferencias específicas de las especies, al tipo de solvente utilizado, al efecto del tratamiento térmico o especialmente al proceso digestivo al que fueron sometidas nuestras muestras.

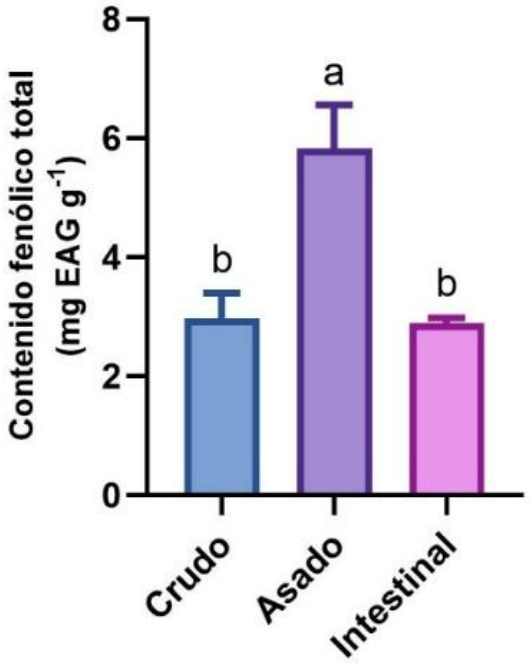


Figura 5. Contenido fenólico total (CFT) de extractos crudos de Lactarius indigo (EtOH 70% 10 min), asados (180 °C, 5 min) y después de la fase intestinal de la digestión in vitro. Los valores representan la media ± DE (n = 4). Los datos fueron analizados mediante ANOVA de dos vías y comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$). Letras distintas denotan diferencias significativas.

Continuando con el análisis de la capacidad antioxidante de las muestras, la Figura 6 muestra los resultados obtenidos mediante los ensayos ABTS y DPPH. Se observa que el ensayo DPPH registró valores significativamente más bajos que en el ensayo ABTS, lo cual es común debido a las diferencias en los mecanismos de neutralización de radicales. Por su parte, en el ensayo ABTS el extracto del hongo asado exhibió la mayor capacidad antioxidante (91.43% con una significancia moderada hacia el extracto del hongo crudo (89.72%), sin embargo; ambos superaron significativamente al digerido intestinal (83.53%). No obstante, en el ensayo DPPH se observó una tendencia opuesta, ya que el digerido intestinal fue quien mostró la actividad antioxidante más elevada (66. 88%), seguido del extracto del hongo asado (62.96%) y por último el extracto del hongo crudo (57.78%).

Estos resultados proponen que el tratamiento térmico (asado) podría haber facilitado la liberación de compuestos fenólicos que estaban ligados, una tendencia recurrente que se ha documentado en otros hongos comestibles (Sun et al., 2014). En otras palabras, los hallazgos reportados aluden a que la capacidad antioxidante del *Lactarius indigo* está parcialmente influenciada por el tipo de tratamiento al que es sometido, mostrando similitud con lo que ha sido reportado por Soler-Rivas et al. (2009) quienes en su estudio evaluaron cómo afectaba la cocción y la digestión *in vitro* a la capacidad antioxidante de las especies *Agaricus bisporus*, *Lentinula edodes* y *Boletus edulis*, encontrando que la digestión intestinal incrementa la capacidad antioxidante medida por los ensayos ABTS y DPPH en comparación con los hongos cocidos mediante diferentes métodos.

La discrepancia observada entre los resultados de los ensayos ABTS y DPPH indica que cada método exhibe distinta sensibilidad hacia los compuestos bioactivos presentes. El ensayo ABTS

parece favorecer los compuestos extraíbles en el hongo asado, mientras que el DPPH mostró mayor afinidad por los metabolitos presentes en el digerido intestinal, posiblemente debido a diferencias en los mecanismos de neutralización de radicales implicados en cada ensayo. El procesamiento térmico en muestras de hongo crudo vs. asado y la digestión gastrointestinal modifican sustancialmente el perfil y la bioactividad de los compuestos fenólicos, y que estos efectos se manifiestan de forma dependiente del método de evaluación antioxidante.

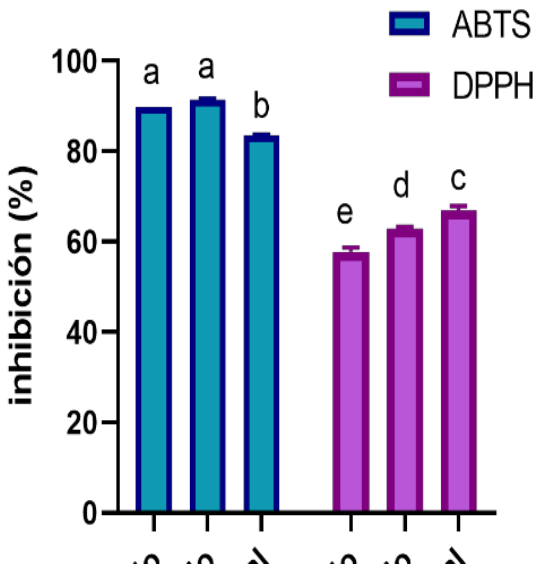


Figura 6. Porcentaje de inhibición de los radicales ABTS$^{\bullet+}$ (barras azules) y DPPH$^{\bullet}$ (barras moradas) en extractos crudos de *Lactarius indigo* (EtOH 70% 10min), asados (180 °C, 5 min) y después de la fase intestinal de la digestión in vitro. Los valores representan la media ± DE (n = 4). Letras distintas denotan diferencias significativas ($p < 0.05$).

En cuanto al proceso de extracción, el uso de etanol como disolvente durante 10 y 30 minutos resultó más eficaz en la recuperación de compuestos fenólicos en comparación con metanol o extracción asistida por ultrasonido. Este último no ofreció beneficios adicionales en términos de actividad antioxidante. Cabe destacar que, aunque la extensión del tiempo de extracción aumentó ligeramente el contenido fenólico, también se observó una disminución en la actividad antioxidante, posiblemente atribuida a la degradación térmica u oxidativa de compuestos sensibles.

Con respecto al procesamiento térmico y la digestión simulada, el extracto del hongo asado mostró un incremento del 93 % en el contenido fenólico comparado con el extracto crudo. Esto podría deberse a la liberación de compuestos previamente ligados a la matriz vegetal durante la cocción. Sin embargo, este aumento no se tradujo de manera uniforme en una mayor actividad antioxidante en ambos métodos: mientras el ensayo ABTS favoreció al extracto asado, el DPPH evidenció una mayor actividad en el digerido intestinal, lo que sugiere diferencias cualitativas en el perfil de compuestos liberados durante el procesamiento térmico y la digestión gastrointestinal simulada. Estos resultados, coinciden con estudios previos que destacan el impacto del tratamiento térmico y gastrointestinal sobre la bioaccesibilidad y funcionalidad de compuestos fenólicos en hongos comestibles (Espejel-Sánchez et al., 2019; Kosanić et al., 2022; Soler-Rivas et al., 2009).

CONCLUSIONES

En conclusión, la extracción con etanol, particularmente a tiempos cortos, fue la más eficiente para recuperar compuestos fenólicos con alta capacidad antioxidante de *Lactarius indigo*, mientras que el baño ultrasónico no ofreció ventajas significativas. Aunque el tratamiento térmico (asado) incrementó notablemente el contenido fenólico, la digestión in vitro reveló que los compuestos liberados

modifican su mecanismo antioxidante según el ensayo utilizado (ABTS o DPPH). Estos resultados confirman que tanto las condiciones de extracción como el procesamiento térmico y digestivo influyen de manera determinante en la estabilidad y funcionalidad de los compuestos bioactivos de este hongo azul. Por lo tanto, se deben considerar en futuros estudios todas estas transformaciones para poder evaluar su potencial como posible alimento funcional o para su posible aplicación nutraceútica.

REFERENCIAS

1. J. Pérez-Moreno, A. Lorenzana-Fernández, V. Carrasco-Hernández & A. Yescas-Pérez, “Los hongos comestibles silvestres del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan y Anexos”, Colegio de Postgraduados, SEMARNAT, CONACyT. Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2009, pp. 167
2. M. Jiménez-Ruiz, J. Pérez-Moreno, J. Almaraz-Suárez, M. Torres-Aquino, “Hongos silvestres con potencial nutricional, medicinal y biotecnológico comercializados en Valles Centrales, Oaxaca”. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol. 4 , 2, 2013, pp. 199-213.
3. M. Nardini, “Phenolic Compounds in Food: Characterization and Health Benefits” Molecules, Vol. 27, 783, 2022. https://doi.org/10.3390/ molecules27030783
4. C. O. López-Sánchez, (2022). México, Tierra de Hongos. Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas. 1 ed: pp 110 -112
5. W.A. Elkhateeb, G.M. Daba, “Highlights on the Wood Blue-Leg Mushroom Clitocybe Nuda and Blue-Milk Mushroom Lactarius Indigo Ecology and Biological Activities”. Open Access Journal of Pharmaceutical Research, Vol. 5, 3, 2021, pp. 1-6.
6. A. González-Morales, R. M. Ribas-Aparicio, C. Burrola-Aguilar, “Actividad antioxidante de hongos silvestres consumidos tradicionalmente en el centro de México” Scientia fungorum, Vol. 52, e1410, 2021. https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1410
7. M. Kosti´c, M. Ivanov, Â. Fernandes, R.C. Calhelha, J. Glamo˘clija, L. Barros, M. Sokovi´c, A. Ciri´c, “A Comparative Study of ´Lactarius Mushrooms: Chemical Characterization Antibacterial, Antibiofilm, Antioxidant and Cytotoxic Activity”, J. Fungi, Vol. 9, 70, 2023 https://doi.org/10.3390/jof9010070
8. M. C. Cepero de García, S. Restrepo-Restrepo, A. E. Franco-Molano, M. Cárdenas-Toquica, N. Vargas-Estupiñán, “Biología de hongos”. Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias. Biológicas; Ediciones Uniandes, 2012. ISBN eBook: 978-958-695-794-6
9. M. Fogarasi, S. A. Nemeș, A. Farcas, C. Socaciu, C. A. Semeniuc, M. I. Socaciu, S. Socaci, “Bioactive secondary metabolites in mushrooms: A focus on polyphenols, their health benefits and applications”. Food Bioscience, Vol 62, 1, 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105166
10. E. P. Gutiérrez-Grijalva, D. L. Ambriz-Pérez, N. Leyva-López, R. I. Castillo-López, J. Basilio-Heredia, Review: dietary phenolic compounds, health benefits and bioaccessibility. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, Vol 66, 2, 2016, http://www.alanrevista.org/ediciones/2016/2/art-1/
11. A. Colak, O. Faiz, E. Sesli, “Nutritional Composition of Some Wild Edible Mushrooms”. Turk J Biochem, Vol. 34, 1, 2009, pp. 25–31.
12. C. Espinosa-Leal , J. F. Treviño-Neávez, R. A. Garza-Padrón, M. J. Verde-Star, C. Rivas-Morales & M. E. Morales-Rubio, “Total phenols and anti-radical activity of methanolic extracts from wild and in vitro conditions of Leucophyllum frutescens”, Rev Mex Cienc Farm, Vol. 46, 2015, pp. 52-56.

13. W. Brand-Williams, M. E. Cuvelier, C. Berset, “Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity”, *Food Science and Technology*, Vol. 28, 1, 1995, pp. 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5.
14. A. Brodkorb, L. Egger, M. Alminger, et al., “Simulación estática in vitro de la digestión gastrointestinal de alimentos mediante INFOGEST”, Nat Protoc., Vol 14 , 2019, pp. 991–1014. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1
15. P. Bakun, B. Czarczynska-Goslinska, T. Goslinski, S. Lijews, “In vitro and in vivo biological activities of azulene derivatives with potential applications in medicine”, Medicinal Chemistry Research, Vol. 30, 2021, pp. 834–846. https://doi.org/10.1007/s00044-021-02701-0
16. S. Xu, Y. Zeng, Q. Yang, J. Zhou, L. Tang, C. Liu & Y. Chen, “Ultrasound-assisted extraction optimization of erinacine A and polyphenols from *Hericium erinaceus* and evaluation of their antioxidant activity”, *Foods*, 9, 12, 2020, pp. 1889. https://doi.org/10.3390/foods9121889
17. L. Sun , X. Bai, Y. Zhuang, “Effect of different cooking methods on total phenolic contents and antioxidant activities of four Boletus mushrooms”, J. Food Sci. Technol, 51, 11, 2014, pp. 3362-8. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0827-4
18. C. Soler-Rivas, A. C. Ramírez-Anguiano, G. Reglero, S. Santoyo, “Effect of cooking, in vitro digestion and Caco-2 cells absorption on the radical scavenging activities of edible mushrooms”, International Journal of Food Science + Technology, 44, 11, 2009, pp. 2189-2197. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02059
19. R. L. Prior, X. Wu, K. Schaich, “Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements”, Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol. 53, 10, 2005, pp. 4290–4302. https://doi.org/10.1021/jf0502698
20. A. Floegel, D. O. Kim, S. J. Chung, S. I. Koo, O. K. Chun, “Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods”, Journal of Food Composition and Analysis, Vol. 24, 7, 2011, pp. 1043–1048. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008

EVALUACIÓN DE DIFERENTES SUSTRATOS AGROINDUSTRIALES EN EL CULTIVO DEL HONGO (*Pleurotus Spp*) EN EL ESTADO DE DURANGO

Jaime Herrera Gamboa[1], Laura Anabel Páez Olivan[1], Merit Cisneros González[1], Darío Cisneros Arreola[1], Manuel Ismael Mata Escobedo[1], Aldo Alejandro Lujan Espinoza [2] y Nalleli Trancoso Reyes[1]

[1]Tecnologico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango.
[2]Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.
jaime.hg @vguadiana.tecnm.mx.

RESUMEN

El Estado de Durango es una zona donde la agricultura representa una de las principales actividades económicas y sociales, dicha actividad es un componente estratégico y generación de empleos. Sin embargo, se producen cantidades significativas de residuos que son desechados y al tener lenta degradación por su naturaleza lignocelulósica ocasionan problemas ambientales, el aprovechamiento de este tipo de residuos en otras actividades productivas es una alternativa de economía circular y valor agregado. Los hongos comestibles se consideran un complemento alimenticio con alto valor nutricional, sus proteínas contienen todos los aminoácidos esenciales, carbohidratos, fibra, vitaminas y minerales. *Pleurotus* spp son un grupo de hongos comestibles que pertenecen a una clasificación conocida como hongo de la pudrición blanca, gracias a su versátil complejo enzimático lignocelulósico puede cultivarse en residuos agroindustriales como sustrato. Además, producen metabolitos secundarios que reducen los riesgos de contraer enfermedades que los posicionan como alimentos nutracéuticos y funcionales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar diferentes sustratos agroindustriales para el cultivo del hongo *Pleurotus* spp en el Estado de Durango. Se utilizaron residuos agroindustriales disponibles en la región de paja de avena y tazol de maíz en tres diferentes tratamientos: T1: avena (100 %), T2: tazol de maíz (100%) y T3: avena y tazol de maíz (50:50 %), siguiendo la metodología de cultivo de Gaitan-Hernandez *et al.,* (2006). Las variables para evaluar fueron rendimiento y eficiencia biológica. Los resultados fueron procesados mediante un análisis de varianza y las medias se compararon con prueba de rango múltiple de Tukey ($P< 0.05$), encontrando que T3 registro un 55% de eficiencia biológica y 500 g/Kg de hongos fresco de rendimiento. El cultivo de hongos comestibles representa una alternativa de bajo costo de inversión, reutilización de materiales residuales sin valoración como sustratos agroindustriales que podrían redirigirse a nuevas actividades productivas que favorezcan el ingreso de pequeños y grandes productores agrícolas, así como contribuir significativamente en la autosuficiencia alimentaria y rescate del campo mexicano en comunidades rurales, sin la necesidad de espacios de tierra, bajo uso de agua y fuente rica de proteínas, vitaminas y minerales.

INTRODUCCIÓN

La desnutrición es un problema mundial que va en aumento en función al crecimiento de la población, sin embargo, se sabe que los hongos pueden ser una alternativa para remediar este problema. (Mayett *et al.,* 2010). Considerándose como un complemento alimenticio con alto valor nutricional, sus proteínas contienen todos los aminoácidos esenciales, carbohidratos, fibra, vitaminas como el niacina, tiamina, B1, B2 y minerales como potasio, fosforo, calcio, entre otros. Además, producen metabolitos secundarios como compuestos fenólicos, polifenoles, carotenoides, polisacáridos y ergosterol, que reducen los riesgos de contraer enfermedades como el cáncer, trastornos cardiovasculares, antioxidantes, antiinflamatorios, contra envejecimiento celular, entre otros compuestos que los hacen alimentos nutraceúticos y funcionales (Cano-Estrada *et al.,* 2016). Las especies del género *Pleurotus* se caracterizan por ser especies lignícolas comestibles y medicinales que pertenecen a un grupo de hongos conocidos como hongos de la pudrición blanca, siendo eficientes descomponedores de maderas duras y blandas, en la naturaleza se desarrollan sobre

materiales leñosos, ricos en fibra como troncos o ramas. Para su cultivo se pueden utilizar otro tipo de materiales lignocelulósicos que contenga una composición similar como residuos agroindustriales y forestales (Aranda-Calipuy *et al.,* 2023).

La industria agropecuaria es de gran importancia para México y a su vez para el Estado de Durango, al ser una zona donde la agricultura tiene alto impacto económico y social, representa un componente estratégico y generación de empleo. Pero esto a su vez produce cantidades significativas de residuos que son desechados y al tener una lenta degradación por su naturaleza lignocelulósica ocasionan problemas de contaminación. El aprovechamiento de este tipo de residuos como sustratos en el cultivo de hongos comestibles, es una alternativa rentable para la obtención de alimento con alto valor nutricional (Cury *et al.,* 2017). Diversos autores han reportado el uso de diferentes residuos en el cultivo de hongos comestibles Ríos-Ruiz *et al.,* 2017 en el cultivo de *Pleurotus* spp y *Auricularia* spp en residuos de pulpa de café reportando eficiencia biológica del 30.33 y 18.20%. Puig-Fernández *et al.,* 2020 reportaron el uso de cascarilla de arroz, pulpa de café y afrecho cervecero como sustratos en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* var. Florida con un rendimiento máximo del 68.02%.

El cultivo de hongos comestibles representa una alternativa para promover la diversificación agrícola, sostenibilidad, generación de ingresos, mejora de la nutrición y desarrollo rural, que a través de las acciones del Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana se trabajó impartiendo cursos en comunidades rurales y Durango capital, con un total de 75 personas. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar diferentes sustratos agroindustriales para el cultivo del hongo *Pleurotus* spp en el Estado de Durango.

TEORÍA

El conocimiento tradicional de los hongos comestibles y/o medicinal día con día cobra más interés dentro de la cultura mexicana, por sus propiedades alimenticias que pueden llegar a ser superiores a muchos vegetales por lo que en la actualidad se ha considerado como un alimento básico, situación que ha dado a una creciente valoración comercial con potencial en aspectos ecológicos, manejo y biotecnología aplicada de este tipo de recursos micológicos. (Guzmán, 2011). El cultivo de hongos puede ser una alternativa que contribuya de manera significativa en la economía circular a través de del aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante su uso como sustratos de cultivo, reduciendo el impacto ambiental, uso de tierra y agua (Grimm y Wösten, 2018). Además, los hongos pueden cultivarse a pequeña escala, proporcionando una fuente de ingreso para pequeños productores y son una fuente rica en proteínas, vitaminas y minerales que contribuye a una dieta más equilibrada y nutritiva para comunidades rurales y urbanas (Gaitan-Hernandez *et al*., 2016)

PARTE EXPERIMENTAL

Las etapas del cultivo se realizaron siguiendo la metodología de Gaitan-Hernandez *et al*. (2006) las cuales consistieron en las siguientes etapas:

1. Selección de materia prima para sustrato: Se utilizaron materiales lignocelulósicos disponibles en cada región como paja de avena y maíz.

2. Preparación del sustrato: Los materiales fueron tamizados en partículas de 3 a 10 mm y posteriormente, se desinfectaron por medio de inmersión en agua en ebullición durante 45 min. Se enfriaron a temperatura ambiente y se ajustó la humedad a 80%. Se almacenaron en bolsas de polipropileno con 1 Kg de sustrato, hasta su inoculación.

3. Siembra e incubación del hongo *Pleurotus* spp: cada sustrato fue inoculado con micelio del hongo en semilla de sorgo, adicionando 5% por cada kilogramo de sustrato para reducir el tiempo de colonización. Los sustratos inoculados, fueron incubados a temperatura ambiente

y obscuridad, observando semanalmente el crecimiento micelial hasta su completa colonización.

4. Fructificación y cosecha: Una vez que el micelio colonizo todo el sustrato, se indujo a fructificación, con luz natural y apertura de la bolsa, permitiendo un flujo de oxígeno y se aplicaron riegos tres veces al día. Para determinar la eficiencia biológica y el rendimiento de los sustratos se determinó de acuerdo con el cálculo de la eficiencia biológica.

Se realizo un diseño aleatorio utilizando dos diferentes residuos agrícolas del cultivo de maíz y avena, en tres tratamientos con diez repeticiones cada uno (Tabla 1). Los resultados fueron evaluados mediante un análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey (P≤ 0.05) en el software estadístico XLSTAT de Microsoft Excel.

Tabla 1. Descripción de tratamientos de los sustratos evaluados para el cultivo de *Pleurotus* spp.

Tratamiento	Sustrato	Proporción (%)	Repetición
T1	Paja de avena	100	10
T2	Tazol de maíz	100	10
T3	Paja de Avena: Tazol de Maíz	50:50	10

RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en las figuras 1 y 2, se muestra la eficiencia biológica y el rendimiento en la producción de hongos comestibles de la especie *Pleurotus* spp utilizando residuos de la producción de avena y maíz, ambos subproductos disponibles en la región. En la determinación de la eficiencia biológica y rendimiento se encontró que el tratamiento (T3) presento el mayor porcentaje (55%) con un rendimiento de (500 g/Kg de sustrato inoculado de hongo fresco). Ambos resultados concuerdan a los reportados por De Madrignac *et al.* 2019 alcanzando de 45.20 a 53.20 % de eficiencia biológica en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum* en residuos de la agroindustria en Paraguay y Sarmiento *et al.* 2023 con un rendimiento máximo del 70 % en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando residuos como sustrato de cascara de cacao, guabas y rastrojo de quinua. Sin embargo, los resultados pueden variar de acuerdo con las características de cada uno de los residuos agroindustriales que se utilicen, así como las mezclas (Páez-Olivan *et al.,* 2024). Por lo anterior, es importante seguir evaluando combinaciones materiales disponibles en la región que eficienticen el cultivo de especies de hongos de interés comestible y/o medicinal (Terrazo, 2023).

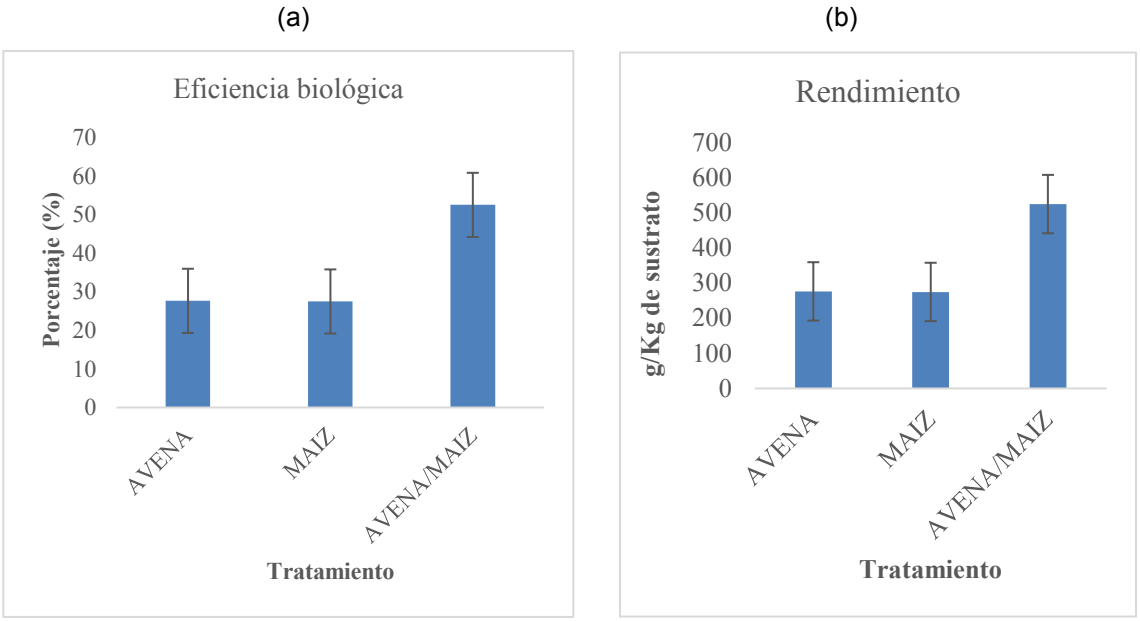


Figura 1. Se muestran los resultados obtenidos promedio y desviación estándar; a) Eficiencia biológica, b) Rendimiento. En el cultivo de hongos comestibles *Pleurotus* spp en residuos agroindustriales disponibles en el Estado de Durango.

CONCLUSIONES

El cultivo de hongos comestibles representa una alternativa de bajo costo de inversión, reutilización de materiales residuales sin valoración, como sustratos agroindustriales que podrían redirigirse a nuevas actividades productivas que favorezcan el ingreso de pequeños y grandes productores agrícolas, así como contribuir significativamente en la autosuficiencia alimentaria y rescate del campo mexicano en comunidades rurales, sin la necesidad de espacios de tierra, bajo consumo de agua y fuente rica de proteínas, vitaminas y minerales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aranda-Calipuy, M. M., Roncal-Lázaro, A., Quezada-Alvarez, M. A., Siche, R., Cabanillas-Chirinos, L., Rojas-Villacorta, W., ... & Rojas-Flores, S. (2023). Pleurotus ostreatus mycelium and sugarcane bagasse as substitute environment-friendly material for polystyrene foam. Sustainability, 15(12), 9157.
2. Cano-Estrada, A., & Romero-Bautista, L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. Revista chilena de nutrición, 43(1), 75-80.
3. Cury, K., Aguas, Y., Martinez, A., Olivero, R., & Ch, L. C. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA, 9(S1), 122-132.
4. De Madrignac, B., & Flecha, A. (2019). Evaluación del cultivo de Pleurotus ostreatus y Ganoderma lucidum (Agaricomicetes, Agaricales Poyporales) empleando sustratos alternativos presentes en el Paraguay. Lilloa, 56(1), 1-13.
5. Guzmán, G. (2011). El uso tradicional de los hongos sagrados: pasado y presente. Etnobiología, 9(1), 1-21.

6. Grimm, D., & Wösten, H. A. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. Applied microbiology and biotechnology, 102(18), 7795-7803.
7. Mayett, Y., & Martínez-Carrera, D. (2010). El consumo de hongos comestibles y su relevancia en la seguridad alimentaria de México. Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI, 293-329.
8. Páez-Olivan, L., Quiñones, C., Naranjo, N., Torres, R., Correa-Ramírez, M., & Herrera, J. (2024). Biological efficiency and evaluation of bioactive compounds of wild mexican strains of Hericium erinaceus. Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia, 41(2), e244120. Retrieved from https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/42269
9. Puig-Fernández, Y., Crespo-Zafra, L. M., Cardona-Soberao, Y. R., Matos-Mosqueda, L., & Serrano-Alberni, M. (2020). Evaluación de tres residuos agroindustriales como sustratos para cultivo del pleurotus ostreatus var. florida: artículo de investigación. Revista científica multidisciplinaria arbitrada yachasun-issn: 2697-3456, 4(7), 164-176.
10. Ríos-Ruiz, W. F., Valdez-Nuñez, R. A., & Jiménez-Flores, J. P. (2017). Aislamiento, propagación y crecimiento de hongos comestibles nativos en residuos agroindustriales. Scientia Agropecuaria, 8(4), 327-335.
11. Sarmiento, J. M. G., Pinto, P. M. M., Rivera, M. M. P., & Castro, J. E. B. (2023). Use of Lignocellulosic Residues for Postharvest Conservation of the Production of the Edible Fungus Pleurotus Ostreatus. ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM, 335-354.
12. Terrazo, A. R. (2023). El legado cultural de los hongos comestibles. Revista de la Universidad de México, (2), 66-71.

FORMULACIÓN DE UN DULCE TÍPICO A BASE DE GARBANZO Y LENTEJA COMO ALIMENTO FUNCIONAL

Erika Ramos Ojeda, Noemi V. Cardona Ochoa, Christian O. Díaz Ovalle, Fabiola Herrera Enciso

Tecnológico Nacional de México Roque
erika.ro@roque.tecnm.mx

RESUMEN

México se caracteriza por la variedad de sabores y colores en sus alimentos, sin embargo, en la actualidad el consumo de dulces tradicionales ha ido disminuyendo considerablemente, debido a la innovación de dulces a base de colorantes y saborizantes artificiales, causando enfermedades crónicas-degenerativas como presión arterial, glucosa, colesterol, exceso de peso, obesidad, diabetes y cáncer causando el 78% de las muertes[1]. La formulación de alimentos funcionales a base de leguminosas como el garbanzo y la lenteja forman parte del grupo de semillas secas y bajas en grasa, con alto nivel proteico y minerales, además, su aporte de aminoácidos esenciales es complementario al de los cereales. Por lo que la presente investigación aprovecha el beneficio de estas leguminosas elaborando un dulce tradicional con oblea a base de harina de garbanzo, lenteja y rellenas con jamoncillo endulzado con Stevia. Se realizaron 3 diferentes formulaciones para la elaboración de la oblea con las siguientes proporciones: 80% de harina de garbanzo (HG) y 20% de harina de lenteja (HL), 70% (HG) y 30% (HL) , 60%(HG), 40% (HL). Mientras que para el jamoncillo la variación fue la proporción del edulcorante con 15%, 25% y 45% respectivamente. Así mismo se realizó la evaluación fisicoquímica y evaluación sensorial a cada formulación, De los resultados se obtuvo que la formulación del 80% de harina de garbanzo y 20% de harina de lenteja, con un 15% de Stevia, cumplió con esta característica conteniendo 20.2278% de proteína, 0.009643% de fibra, 25.8333% de grasa, 3.6837% de cenizas y 14.8002% de humedad, valores que también comparados con la muestra comercial demuestran la significativa diferencia de nutrientes que contiene, la formulación que contiene Y finalmente fue la preferida con un 20.99% respecto a sus propiedades organolépticas, como lo son el sabor, olor, textura y color logrando la formulación de un dulce altamente nutrimental, conservando la tradición mexicana.

INTRODUCCIÓN

México es conocido por su rica cultura, costumbres y tradiciones alimentarias. Los dulces típicos mexicanos son una explosión de sabores y colores que deleitan a todos aquellos que los consumen. El jamoncillo es un dulce típico de México elaborado con leche, azúcar y canela. Es muy popular en el norte y el centro del país. Así mismo las obleas mexicanas también forman parte de los dulces las cuales fueron introducidas en México por los conquistadores, quienes trajeron consigo la tradición de utilizar obleas en la repostería y la gastronomía. Desde entonces, se han convertido en una delicia culinaria muy apreciada en el país.

Por lo que la producción de estas a base de legumbres es una opción nutrimental en la alimentación de adultos y niños. Las legumbres son alimentos muy completos ya que en su composición se encuentran todo tipo de nutrientes como agua, hidratos de carbono, fibra, grasas, vitaminas y minerales (destacan las del grupo B) y proteínas (Aguilar, 2013).

En México, se estimó en 2012 que 58% de los niños y 66% de las niñas en edad escolar consumieron más azúcares añadidos con respecto a la recomendación de la OMS y su consumo promedio fue de 55 y 52 g/día, respectivamente. En la población adolescente, 71% de los hombres y 64% de las mujeres no cumplieron con la recomendación y su consumo promedio fue de 72 y 64 g/día de azucares añadidos, respectivamente (Ensanut, 2023). Por lo que la recomendación del consumo de alimentos funcionales los cuales son componentes alimenticios cuyo consumo además de una nutrición básica, genera beneficios para la salud y/o reduce el riesgo de enfermedad.

Se considera funcional, un alimento en su estado natural, o un alimento al cual se han adicionado, removido o modificado uno o más de sus componentes (Cortes 2005).

El garbanzo y la lenteja forman parte del grupo de semillas secas y bajas en grasa, y han sido adoptadas en todo el mundo como principal fuente de proteínas y minerales; además, su aporte de aminoácidos esenciales es complementario al de los cereales (Ronald, 2011).

Así mismo la Stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) en particular es un aditivo alimentario bajo en calorías. Es valorada debido a su composición rica en un glucósido bajo en calorías llamado *esteviósido* cuyo poder edulcorante en estado puro y cristalino es 300 veces mayor que el azúcar de caña. Reduce los niveles de glucosa en la sangre hasta en un 35% (Ronald, 2011).

METODOLOGÍA

se realizó el diseño de la formulación de un nuevo producto, una oblea a base de garbanzo y lenteja con relleno de jamoncillo endulzado con Stevia, al cual se le aplicaron las técnicas proximales y análisis sensorial.

Se utilizaron las siguientes formulaciones para su elaboración:

- 80% harina de garbanzo (HG) y 20% de harina de lenteja (HL)
- 70% harina de garbanzo (HG) y 30% de harina de lenteja (HL)
- 60% de harina de garbanzo (HG) Y 40% de harina de lenteja (HL)

Adicionando agua, aceite de coco y bicarbonato.

Así mismo se realizó una formulación para el relleno de las obleas a base de jamoncillo en donde la variación se dio en las proporciones de Stevia como se muestra a continuación:

- 15% de Stevia por litro de leche
- 25% de Stevia por litro de leche
- 45% de Stevia por litro de leche

Adicionando bicarbonato y canela.

Se realizó los análisis proximales de cada una de las muestras obteniendo su contenido nutrimental con la determinación de humedad, proteína, grasa, fibra, ceniza, utilizando como estándar una marca comercial. En la prueba sensorial se evalúan las muestras respecto a color, olor, sabor, aroma, textura y apariencia. Se tuvo la participación de 50 jueces no entrenados, seleccionados de edades entre 6 y 70 años. Se les proporcionaron 3 muestras codificadas con números aleatorios a cada juez, un vaso de agua purificada para enjuague. Para medir el nivel de agrado, se utilizó una escala hedónica de 5.

RESULTADOS

El porcentaje de humedad en las obleas rellenas de jamoncillo es un parámetro importante, ya que esta influye en la textura y vida útil del producto. De acuerdo a la literatura, las tres formulaciones están dentro de los parámetros entre 12-20% de humedad, refiriendo que los valores obtenidos están dentro de los valores de referencia por lo que se considera aceptable como se muestra en la figura 1.

La determinación de cenizas indica el porcentaje de minerales contenidos en un alimento, en base a esto se observa en la figura 2, en comparación con la oblea comercial tienen un alto contenido en cenizas, ya que el garbanzo y la lenteja contienen minerales entre los que destaca calcio, magnesio, hierro, zinc y fosforo.

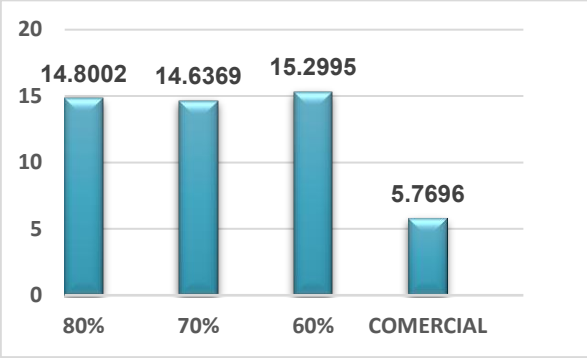


Figura 1. Determinación de humedad

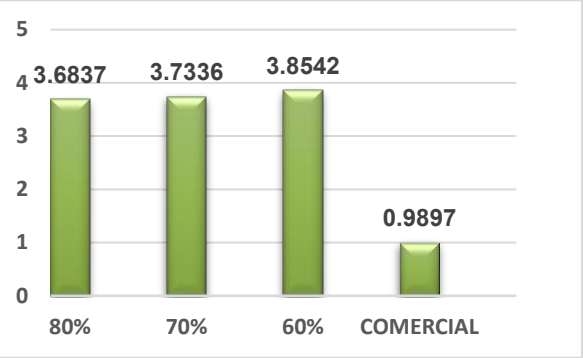


Figura 2. Determinación de ceniza

La determinación de grasa del garbanzo y la lenteja como se muestra en la figura 3, oscila entre 5 y 2 g respectivamente, además de sumar el porcentaje de grasa de la leche de 3-4 %. De igual manera se debe considerar la adición del aceite de coco el cual contiene 86 % de grasa. Aumentando considerablemente el % de grasa del dulce mexicano. Sin embargo, este tipo de grasa es considerada una grasa saturada, por lo tanto, mucho más estable que otros aceites vegetales, ya que su punto de oxidación es más alto (Ribeiro, 2020).

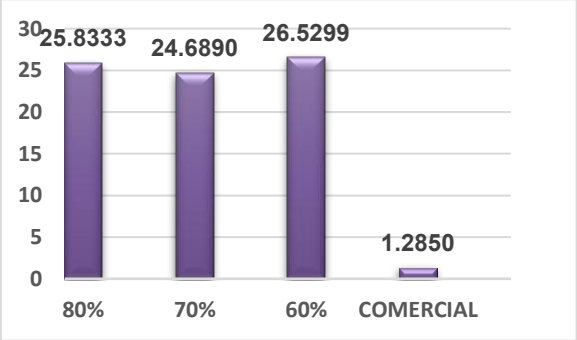


Figura 3. Determinación de grasa

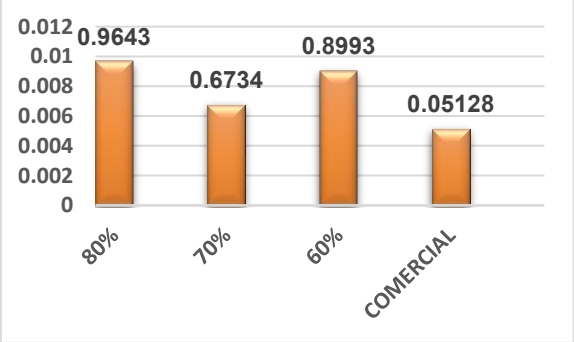


Figura 4. Determinación de fibra

Los resultados que presenta la figura 5 en las tres formulaciones se muestra un valor proteico elevado, llegando a 20.2278% en la formulación del 80%, en comparación con la oblea comercial, teniendo presente que las harinas de estas legumbres tienen esa característica, sumando a la proteína que la leche aporta este alimento.

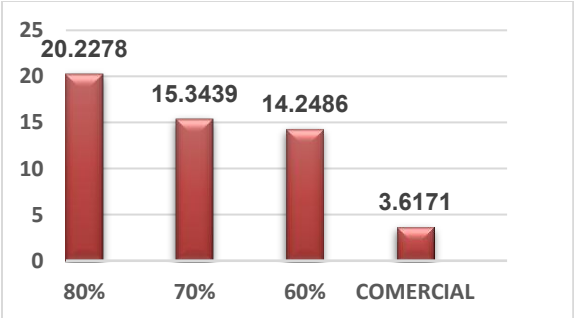


Figura 5. Determinación de grasa

Para el análisis sensorial se observa la preferencia del 20.99% con una calificación de 5 (me gusta mucho), por la formulación 80% (501), respecto a su balance en sabor de la oblea con el jamoncillo, menor sabor dulce y mejor textura. Se aprecia que en general la oblea fue aceptada, teniendo mayor calificación entre el 4 y 5 de la escala hedónica de aceptación. Estos resultados permitieron seleccionar la mejor formulación.

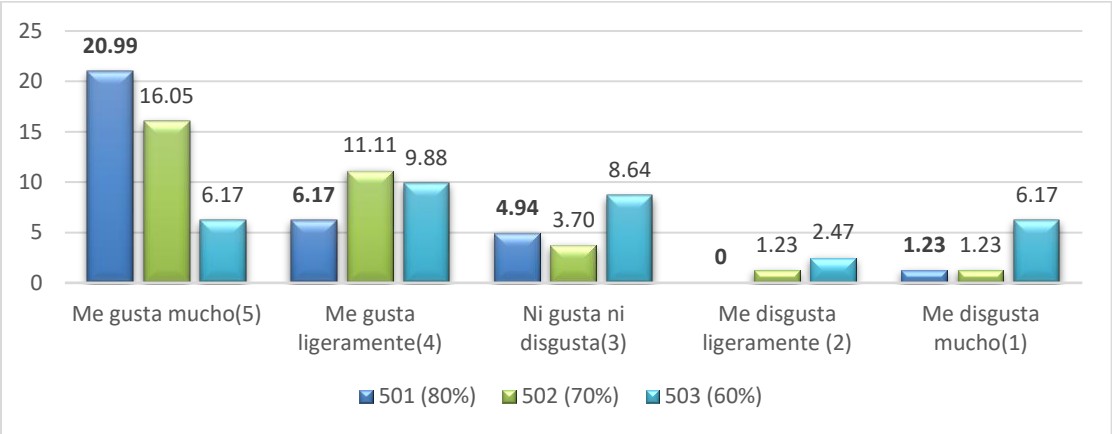


Figura 6. Porcentaje de aceptación

CONCLUSIONES

Se obtuvo que la formulación del 80% de harina de garbanzo y 20% de harina de lenteja, con un 15% de Stevia, presentó los mejores atributos conteniendo 20.2278% de proteína, 0.009643% de fibra, 25.8333% de grasa, 3.6837% de cenizas y 14.8002% de humedad, valores que también comparados con la muestra comercial demuestran la significativa diferencia de nutrientes que contiene. Finalmente fue la preferida con un 20.99% respecto a sus propiedades organolépticas, como lo son el sabor, olor, textura y color.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar-Raymundo, V. G., and J. F. Vélez-Ruiz. "Propiedades nutricionales y funcionales del garbanzo (Cicer arietinum L.)." *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos* 7.2 (2013): 25-34.

2. Cortés, Misael, Amparo Chiralt, and Luis Puente. "Alimentos funcionales: una historia con mucho presente y futuro." *Vitae* 12.1 (2005): 5-14.

3. Ensanut. “Sobrepeso, obesidad y consumo de azúcares en población escolar y adolescente de México”. Cuernavaca, Morelos, México, 2023.
4. Ribeiro, L. G. T. la verdad científica sobre un superalimento funcional denominado aceite de coco, 2020.

5. Ronald S. Kirk, R. S. *Composicion y analisis de alimentos de Pearson.* (2011). Mexico: Patria.

DEL ALTAR AL PALADAR ¡POVECHO!

Juan Manuel Quezadas Fuentes[1], José Roberto Vázquez Avendaño[1], Bárbara Vargas Miranda[2], Alfredo Trejo Córdova[1] y Demetrio Alonso Ambriz García[1]

[1]Departamento de Biología de la Reproducción. [2]Departamento de Ciencias de la Salud. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco Núm. 186. Col. Leyes de Reforma 1ª Sección,Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09310. Ciudad de México, México.
quezadas_mbra@xanum.uam.mx

RESUMEN

El día de muertos es de gran tradición en México. Las familias ponen ofrendas en sus hogares dedicadas a sus seres que han fallecido, en ellos colocan platillos y bebidas que estos disfrutaban en vida. Según la costumbre durante el 1 y 2 de noviembre, los difuntos regresan a degustar esas delicias culinarias. Parte integral de las ofrendas es la flor de cempasúchil (en náhuatl “planta de las veinte flores”), la cual adorna y "guía a los espíritus". Una vez pasada la festividad, las ofrendas se retiran, los platillos y bebidas se reparten y consumen en familia, dejando como desechos los adornos florales, los cuales pudieran tener utilidad si se manejan correctamente. Podría compostearse para generar abonos o aprovechar las semillas para la alimentación humana y animal. El presente trabajo se realizó con el objetivo de saber si dicha planta con flor colocada en la ofrenda (CO) madura sus semillas y si éstas podrían utilizarse para germinación y consumo, para ello se compararon con las flores maduradas de plantas en cultivo en tierra (CT). Se dejaron secar las flores en la planta y se cortaron con 1 cm de tallo (CO y CT). Se pesaron con pétalos y sin pétalos. Posteriormente se contó el número de semillas. De éstas se evaluó el porcentaje de germinación y el aumento de masa a 5 días. Por último, se hicieron pruebas sensoriales hedonistas para consumo de germinados. Se encontró que el peso de flores con pétalo fue de 1.5 ±0.5 y 1.9 ±0.4 g (p=0.007, CT y CO, respectivamente). En tanto que sin pétalos fue de 0.7 ±0.2 y 0.9 ±0.2 g (p=0.005). El número de semillas fue de 238±62.2 y 161±39.6 (p= 0.02 respectivamente), La germinación fue de 59.7±7% y 61.1±4.5% (p=0.4, respectivamente) y la masa de germinación fue de 4.79±0.39 y 3.33±0.44 gr (p= 0.01, respectivamente). El análisis sensorial fue positivo reportando que el sabor y la textura son agradables al paladar humano. Nuestro trabajo reporta que flores en ofrenda son una fuente de semillas viables ya que sí maduran pudiendo germinar y destinarse al consumo.

INTRODUCCIÓN

Comenzar explicando que el título es correcto, así: “povecho”, indicando que la dulzura, gusto, por el consumo del alimento de inmediato dan ganas de compartir e invitar a otros, aunque para ello, por la ocupación de la boca, haya necesidad de alterar un poco la pronunciación. Por otro lado, el sincretismo entre la cultura española y la mesoamericana, como la mexica, derivó en interesantes interculturalidades que permean hasta nuestros días. Por un lado, la española, a su vez, influenciada por la cultura judeo - cristiana, donde la muerte era (dependiendo del comportamiento seguido en vida) motivo de liberación y encuentro con el creador en el espacio celeste, armónico y pletórico de paz, por otro lado, la mexica, consideraba también la importancia de llegar, luego de la muerte a un lugar mejor, pasando durante un tiempo por la oscuridad y vacío, hasta llegar al encuentro de nueva vida (Mictlán). En esta última existía la creencia de que, durante un tiempo corto a través del año, los espíritus de los difuntos podían compartir con sus familiares (deudos) en el ambiente terrestre, para lo cual se construía los elementos esenciales de goce, que en vida el(la) finado(a) tenía, especialmente en los alimentos y la bebida (Cortés, 2022). Es aquí donde el sincretismo inicial debatió, puesto que los españoles a través del cristianismo imperante y como deriva de la cultura judeo -cristiana consideraron esas “ofrendas” de contacto con los difuntos, como un elemento vinculado al mal, puesto que, el culto a los muertos era algo prohibido.

Entre los cristianos, los difuntos ya en el cielo, gozan de ese ámbito y sus prerrogativas, pero ya no del contacto con los vivos y menos aún en el plano terrenal, puesto que nadie puede regresar una vez llegado ahí. Finalmente, producto de la fusión de ambas culturas (española y mesoamericana),

se ha apoyado el disponer de ofrendas o “monumento”, es decir una serie de elementos tangibles de bebida y comida, para compartir su esencia con los espíritus de los difuntos que vienen a convivir la esencia de dichos elementos (Cortés, 2022). Aunque posteriormente son los vivos los que aprovechan todo ese manjar. En estas ofrendas, ha sido trascendente una planta que naturalmente florecía en la zona del altiplano, con nombre náhuatl de cempasúchil o planta de las veinte flores, por tener ese elemento en el número indicado. Las flores de esta planta (Imagen 1), son de color muy llamativo, amarillo-naranja, que recordaba de inmediato al sol y centro de vida. Así pues, en las ofrendas, se coloca este elemento esencial que además del color vistoso de las flores, contrastando con el intenso verde de los tallos y hojas, tiene un aroma muy intenso que invita al sosiego y a la meditación como un efecto del incienso, además que tiene una duración de varios días en muy buena condición, luego de ser cortada y colocada en floreros con agua (Cortés, 2022).

Imagen 1. Cultivo de cempasúchil en Ayapango, Estado de México

Por si esto fuera poco, la planta de cempasúchil tiene un aroma que resulta ser un repelente para insectos y de esta manera proteger aún más los alimentos (García-Muñoz 2023).
Varios lugares en la zona centro del país (México) tiene muy arraigada esta tradición de modo que los altares pueden localizarse en los panteones, en las casas, en los tempos y últimamente en casas de cultura, escuelas, instituciones y diversos lugares públicos. En algunos de ellos la espiritualidad es máxima, por ejemplo en Mixquic (Tláhuac) al Sur de la Ciudad de México, También, en Xochimilco, Coyoacán, de la misma Ciudad y una muy interesante es en la isla de Janitzio, Michoacán, por la vistosidad, la velada, las luces de los cirios y veladoras, así, como el ir y venir durante toda la noche de embarcaciones sencillas y la gran apertura de los lugareños que permiten sin recelo es respetuoso acercamiento de los miles de turistas (Cortés, 2022).

Una vez cumplido este tiempo de ofrenda, los alimentos y bebidas son aprovechados por familiares y amistades, en tertulias de interacción y de reflexión.

La *targetes erecta,* nombre científico del cempasúchil (García-Muñoz, 2023), tiene alta germinación, acepta diferentes sustratos, resiste a la resiembra y a la conservación de la semilla. Los germinados de diversas semillas, son importantes fuentes de proteína, carbohidratos, vitaminas y minerales para las personas (Arieta, A. 2021).

Las plantas de cempasúchil se dispondrán generalmente hacia los residuos sólidos (camión recolector) o para compostaje y es justo aquí donde surge la inquietud del presente trabajo que tiene por objetivo el saber si las semillas presentes en esas flores pueden servir para germinar (Arrieta, 2021) y en dado caso conocer el sabor y condiciones organolépticas del germinado de cempasúchil para consumo humano.

PARTE EXPERIMENTAL

Se contaron con dos grupos de plantas de cempasúchil. Uno de ellos fue cortado en fase de floración y colocada en un altar u ofrenda los días de muertos (CO). Posteriormente se dejó secar a la intemperie, para recuperar las flores secas con las semillas. En tanto otro grupo se dejó en tierra (CT, Ayapango, Estado de México) para que se secara. Una vez logrado, se recuperaron las flores secas con semillas, para las siguientes pruebas:

Pesaje de las flores
Pesaje de las flores secas. Se utilizó una báscula digital de capacidad de 300gr para determinar el peso de cada flor, con o sin pétalos, en 20 flores de cada grupo.

Determinación del número de semillas.
Se cortó un poco del peciolo seco, para abrir la corola. Se dispersaron las semillas en una caja Petri de 10cm de diámetro y se procedió a contarlas manualmente. En 20 flores de cada grupo.

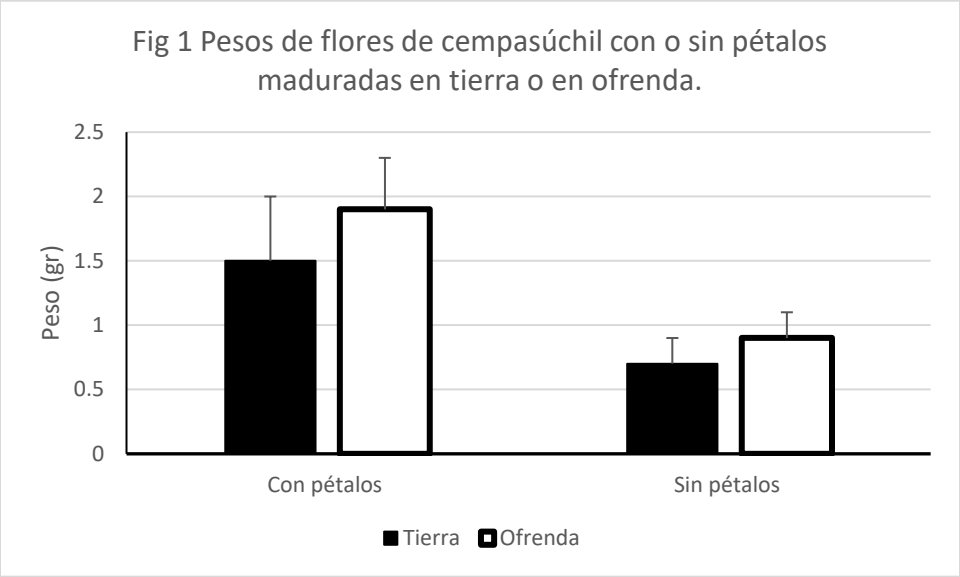
Pruebas de germinación.
Se colocaron 20 semillas homogéneas (5 repeticiones), con buena apariencia de cada grupo (CO y CT), en una servilleta formando una hilera, se enrollo sucesivamente y humedeció con agua limpia. Se colocó dentro de una bolsa de plástica en un lugar fresco y sombrío para la germinación durante 7 días. Al cabo de ello, fueron descubiertas y verificado el número de semillas que germinaron.

Elaboración de germinados y determinación de la masa.
Se colocó 0.5 gr de semillas de cada grupo (CO y CT) en tubos de centrifuga de 15 ml con 10ml de agua y 5µl de cloro durante 30 minutos para desinfección. Se lavaron 3 veces y se dejaron con 14 ml de agua durante 24 horas para hidratación. Posteriormente se colocaron en tubos de centrifuga de 50ml abiertos con malla mosquitera en la boquilla sujeta con ligas. Y dejaron boca abajo a 45° para drenar. Cada día se hidrataron con 2 ml de agua y siguieron drenando en un lugar freso y oscuro. A los 7 días se recuperó el germinado y se determinó su peso en la báscula (Arrieta, 2021).

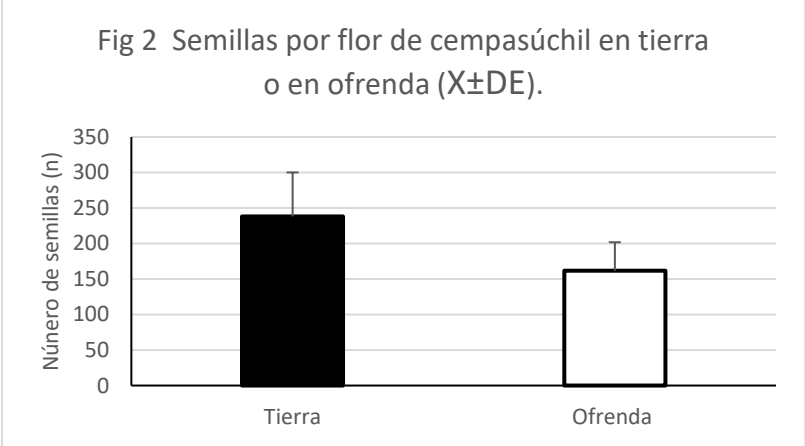
Pruebas sensoriales hedónicos.
Los germinados de ambos grupos (CO y CT) fueron sacados de los tubos y ofrecidos de manera libre a un grupo de 10 personas, para su degustación. Pidiendo información en relación a sabor, textura y gusto.

RESULTADOS

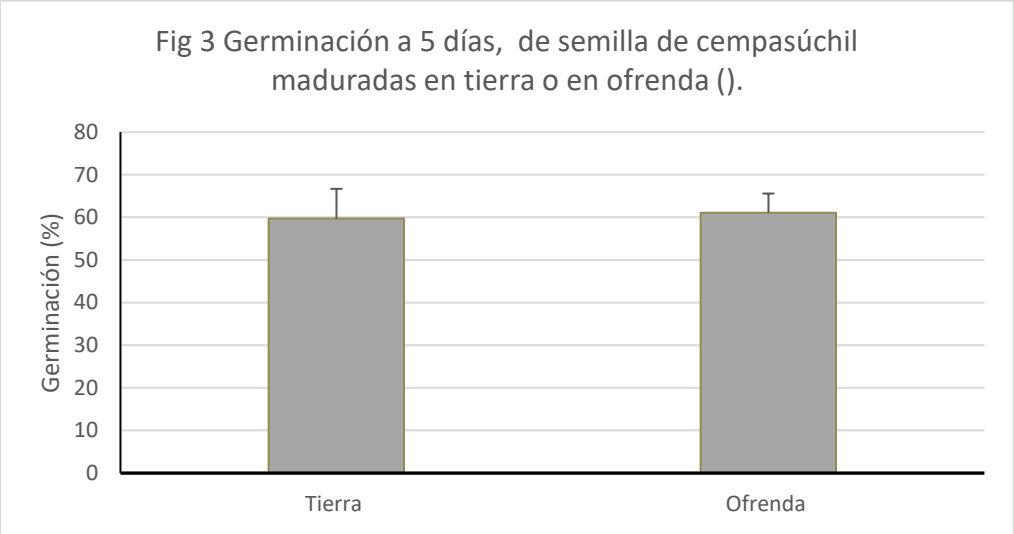
El peso de flores con pétalo fue de 1.5 ±0.5 para el grupo de flores en Tierra (CT) y de 1.9 ±0.4 g ($p=0.007$) para las flores de Ofrenda (CO) (Fig 1). En tanto que sin pétalos fue de 0.7 ±0.2 y 0.9 ±0.2 g ($p=0.005$) respectivamente.



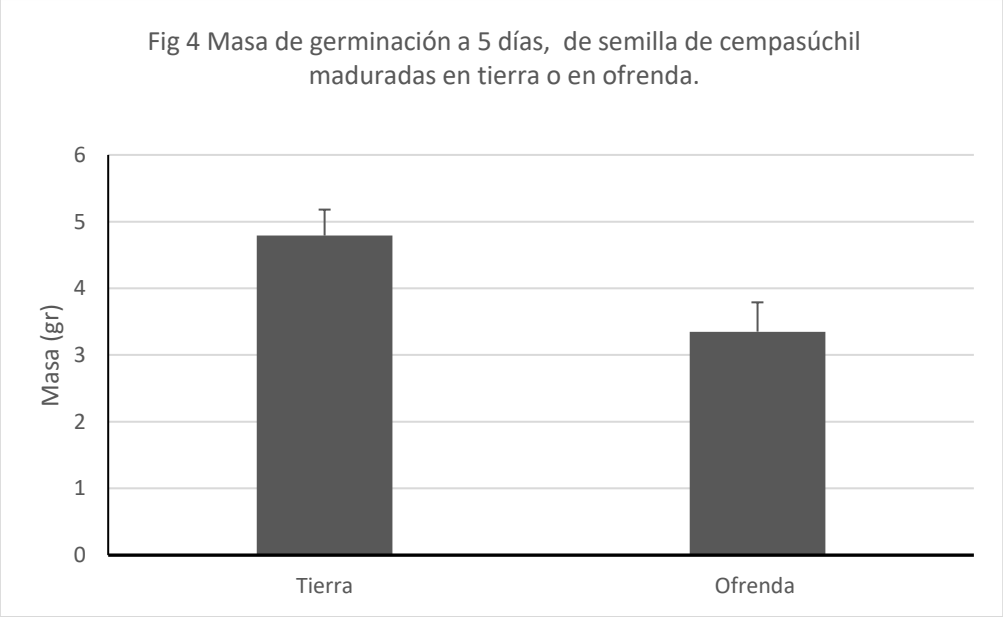
El número de semillas fue de 238±62.2 para CT y 161±39.6 para CO (p= 0.02) (Fig 2)



La germinación fue de 59.7±7% para CO y 61.1±4.5% para CT (p=0.4, Fig 3)



La masa de germinación fue de 4.79±0.39 para CT y 3.33±0.44 gr para CO (p= 0.01, Fig 4).



Las pruebas hedonistas en cuanto a sabor, textura, jugosidad, demostraron que fueron del agrado de los consumidores, no detectando algún elemento contrario a la palatabilidad. Declarando que sin problema lo volverían a consumir. Al término de la prueba les fue descrito el origen del germinado puesto que durante la prueba solo se comentó que era un germinado y como tal, fue consumido sin problema alguno.

Esto indica que la probabilidad del aprovechamiento de la semilla a partir de las flores de la ofrenda es posible y si bien los parámetros comparativos con la semilla de plantas cultivadas en tierra son ligeramente inferiores (masa del germinado) si es posible obtener beneficio de este recurso, que dicho sea de paso es desechado en gran escala en a temporada post día de muertos (1 y 2 de noviembre).

DISCUSIÓN

Es importante la concientización de la optimización de los recursos para alimentación. Si bien la FAO nos describe que desde la producción, cosecha, venta y almacenamiento se desperdicia alrededor del 40% de los alimentos. También, en fechas recientes se ha recalcado la relevancia de la producción de alimentos, al menos algunos de ellos, desde casa, incluyendo medios urbanos, dado que esto impacta de manera positiva en las personas, especialmente en los niños para concientización del esfuerzo y tiempo para su producción, comercialización y consumo. Así también la posibilidad del aprovechamiento de lo que considera un residuo (basura).

La mayor parte de las personas que utiliza la flor de cempasúchil para las ofrendas del día de muertos la descarta una vez concluidas las fechas. La mayoría de ellas hacia el camión recolector de residuos sólidos. Por lo que el conocimiento de que la flor puede secarse y la semilla recuperarse puede ser de importancia.

En el presente trabajo las flores de la ofrenda tuvieron mayor peso, con (1.5 g vs 1.9 g) y sin pétalo (0.7 g vs 0.9 g), debido en parte a que en el cultivo en tierra hubo invasión de caracol que comprometió el desarrollo de las flores, encontrando diferencias significativas en este parámetro. Sin embargo, no fue afectado el número de semillas por flor, por lo que el grupo de flores en tierra tuvieron más semillas (238±62.2) que las de la ofrenda (161±39.6), que representó casi el 50% más de semillas, lo que pone de manifiesto que a pesar del ataque sufrido, la esencia para la replicación de la planta: la semilla, fue conservada y cuidada. Lo cual se corresponde con García-Muñoz en 2023, quien determinó que la cantidad de semillas presente por flor de cempasúchitl puede ir de 200 a 400 semillas. Sin embargo, en los porcentajes de germinación no hubo diferencias entre grupos, siendo similar los resultados entre ambos grupos, lo que da importancia a este trabajo en el sentido de que la semilla de flores en la ofrenda se encuentra en buen estado para la germinación (59.7±7% para CO y 61.1±4.5% para CT) sin diferencias significativas. Aunque si hubo un mejor desempeño de la semilla de cultivo en tierra para el desarrollo de la masa de germinación 4.79±0.39 vs 3.33±0.44 gr de la de ofrenda, lo que representó una mejoría del 31%. A pesar de ello la posibilidad de generar germinado de buena calidad a partir de la semilla de la flor de cempasúchil procedente de la ofrenda es alentadora. Por su parte García-Muñoz e 2023 señala que la semilla fresca de cempasúchil puede tener hasta una germinación hasta de 84%, lo que es mayor a lo aquí reportado, quizá porque ese autor trabaja con semilla comercial y la utilizada en el presente estudio es de origen nativo.

Finalmente, en las pruebas sensoriales hedonistas, así como en la revisión de la literatura respectivo no se encontró algún elemento contrario a la aceptación del producto, así como presencia de algún probable elemento tóxico.

CONCLUSIÓN

Es posible la utilización de la semilla de la flor de cempasúchil luego de aprovechar la flor durante las ofrendas de muertos. Se puede generar germinados que pueden ser consumidos dado que su sabor, jugosidad y palatabilidad son aceptables y en especial, a partir de esta experiencia, es posible concientizar a otros, en relación al aprovechamiento de los recursos para la alimentación.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Arrieta Miranda (2021) Importancia de los germinados para el consumo humano. Tesis de Microbiología. Santander, Bucaramanga, Colombia. 59pp
2. A. Cortés Ramírez (2022). Producción de cempasúchil en el predio Las Animas, Tulyehualco, CDMX. Informe de Servicio Social Agronomía. 16pp
3. S. García-Muñoz (2023) Efectos de diferentes sustratos en la germinación y desarrollo del cempasúchil. Rev. Biológica Agropecuaria 11(1):45-5

IMPACTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN EL SIMBIOSISTEMA *Azolla-Anabaena Azollae* Y MECANISMOS DE TOLERANCIA

Amelia López-Herrera[1], Libia Iris Trejo-Téllez[1],
Fernando Carlos Gómez-Merino[1], Hilda Araceli Zavaleta-Mancera[1]

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México, México. C. P. 56264.
lopez.amelia@colpos.mx

RESUMEN

La nanotecnología se ha implementado en una amplia gama de aplicaciones industriales, conduciendo inevitablemente a la liberación de nanomateriales al medio ambiente. Las nanopartículas de plata (AgNPs) son uno de los nanomateriales más utilizados en diversos productos de consumo, debido principalmente a sus propiedades bactericidas. Son liberadas al ambiente a través de aguas residuales industriales, escorrentías agrícolas o por eliminación de productos de consumo que las contienen. *Azolla filiculoides* es un helecho acuático de agua dulce empleado en esquemas de remediación de aguas contaminadas por compuestos orgánicos e inorgánicos y capaz de fijar N_2 por su asociación con la cianobacteria *Anabaena azollae*. La presente investigación evaluó el efecto de concentraciones crecientes de AgNPs (0, 1, 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg L^{-1}) en solución nutritiva Yoshida en las interacciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas del simbiosistema *Azolla-Anabaena*, con el fin de comprender los efectos fitotóxicos de las AgNPs, para evaluar sus implicaciones ambientales y promover el avance de prácticas nanotecnológicas sostenibles. Se utilizaron AgNPs las cuales se agregaron en un contenedor de plástico, con 1 L de solución nutritiva y 1 g del helecho acuático considerado como unidad experimental, con cinco repeticiones en un diseño completamente al azar, durante 25 d. Las AgNPs redujeron la acumulación de biomasa y generaron cambios morfológicos en el helecho acuático. El contenido de clorofilas *a*, *b* y total disminuyó significativamente con respecto al testigo. No se encontraron diferencias significativas en carotenoides. La relación entre la clorofila *a* y clorofila *b* más alta (3.18) se alcanzó con 5 mg AgNPs L^{-1}, lo que se tradujo en reducciones en las proporciones de clorofila total/carotenoides, indicando un efecto protector del aparato fotosintético. La relación entre clorofila total/carotenoides más baja (5.95) fue con 100 mg AgNPs L^{-1}. Valores bajos de esta relación indican senescencia, estrés y daño al sistema fotosintético. La mayor reducción de biomasa y disminución del contenido de pigmentos fotosintéticos ocurrió en la concentración más alta de AgNPs (100 mg L^{-1}). Las AgNPs afectan diferencialmente la concentración de azúcares totales y actividad antioxidante, primero incrementando, y subsecuentemente, disminuyendo. La máxima concentración de azúcares totales se alcanzó en 20 mg AgNPs L^{-1}, indicando un desequilibrio hídrico, generando más carbohidratos que sirven como ajustadores osmóticos. La mayor actividad antioxidante ocurrió en 10 mg AgNPs L^{-1}, sugiriendo prevención por daño oxidativo. El análisis anterior revela el valor del crecimiento e interacciones bioquímicas como biomarcadores del estatus fisiológico de plantas acuáticas expuestas a AgNPs.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido usadas en numerosos productos de consumo, especialmente en las industrias farmacéutica, electrónica, purificación de agua y textil, debido a sus propiedades antimicrobianas. Sin embargo, su liberación al medio ambiente ha suscitado preocupación de sus impactos ambiental y biológico (Szczyglewska *et al*., 2023). Una vez en el ambiente, las AgNPs pueden tener consecuencias ecológicas imprevistas debido a su pequeño tamaño y gran superficie (Noori *et al*., 2024). En los últimos años, se ha prestado considerable atención a la fitotoxicidad de estas nanopartículas metálicas y sus posibles efectos adversos en las plantas, dado que son los productores primarios y componentes integrales de los ecosistemas, siendo los ecosistemas acuáticos uno de sus principales sumideros (López-Herrera *et al*., 2024).

Las AgNPs pueden ser absorbidas por las plantas a través de las raíces o estomas y una vez en las células vegetales, pueden interactuar con los componentes celulares y alterar los procesos fisiológicos y bioquímicos (Noori *et al*., 2024). *Azolla filiculoides* es un helecho acuático de agua dulce, que fija nitrógeno atmosférico (N_2) en asociación simbiótica con la cianobacteria *Anabaena azollae*. Presenta una alta tasa de duplicación, por lo que es una planta usada en esquemas de fitorremediación de aguas superficiales contaminadas por compuestos orgánicos e inorgánicos (López-Herrera *et al*., 2021). Para avanzar en el conocimiento sobre la toxicidad de las AgNPs en el medio acuático, es importante evaluar si las plantas acuáticas que presentan potencial para fitorremediación pueden emplearse en esquemas de remediación de nanopartículas metálicas, dado que éstas pueden responder diferente a nivel fisiológico y ser afectadas en procesos vitales como el crecimiento, el desarrollo y la fotosíntesis, aunado al gran potencial de estos nanomateriales para inducir estrés oxidativo. Por lo anterior, en el presente trabajo se evaluó el efecto de concentraciones crecientes de AgNPs (0, 1, 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg L^{-1}) en solución nutritiva Yoshida en las interacciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas del simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae*, con el fin de comprender los efectos fitotóxicos de las AgNPs y promover el avance de prácticas nanotecnológicas sostenibles.

PARTE EXPERIMENTAL

La solución de AgNPs se utilizó a una concentración del 3%, de acuerdo con la siguiente formulación: 1.88 g 100 g^{-1} de polivinilpirrolidona (PVP), 0.94 g 100 g^{-1} de colágeno hidrolizado, 0.18 g 100 g^{-1} de plata metálica y 97 mL de agua destilada. El helecho acuático *A. filiculoides* colectado en Ensenada, Baja California, México se mantuvo en un invernadero del Programa en Edafología, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Las AgNPs fueron adicionadas a la solución nutritiva Yoshida (Yoshida *et al*., 1976) para tener las concentraciones finales de 1, 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg AgNPs L^{-1}. En el testigo se usó la solución nutritiva Yoshida sin adición de AgNPs. Después de 25 d de exposición a los tratamientos, se observaron los cambios morfológicos de la planta, y se midió la acumulación de biomasa (por triplicado), contenido de pigmentos fotosintéticos, así como la concentración de azúcares totales y actividad antioxidante total. El peso de 1 g de la planta fue colocado en un contenedor de plástico (10 cm × 15 cm × 23 cm) con 1 L de solución hidropónica, el cuál fue considerado como unidad experimental. Cada tratamiento fue repetido cinco veces. Para mantener la disponibilidad de los nutrimentos y una alta solubilidad de las AgNPs, el pH fue ajustado a 5.5 (Oukarroum *et al*., 2013) además de considerar un sistema de oxigenación. Los datos obtenidos fueron procesados utilizando el software estadístico SAS 9.4. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unidireccional para determinar diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$) utilizando la prueba de Tukey.

RESULTADOS

Las plantas testigo mostraron una morfología característica del helecho flotante. Las hojas de las frondas son imbricadas y cubren un tallo ramificado (rizoma) con raíces adventicias. Los lóbulos flotantes son de color verde y fotosintéticos (Figura 1A), y los lóbulos sumergidos son incoloros y no fotosintéticos (Figura 1B). Las raíces de las plantas fueron adventicias y numerosas, de apariencia fasciculada y no ramificada, con pelos radicales traslúcidos (Figura 1B).

En el tratamiento 1 mg AgNPs L^{-1} el lóbulo flotante presentó un color verde semejante al testigo (Figura 1C). Conforme la concentración de AgNPs incrementó, se observó la intensificación en el color verde de las hojas que se ubicaban hacia el centro de las frondas, las cuales además estaban cercanas a otras con color café (Figura 1E, G). Hacia la periferia de las frondas, se identificaron hojas con color verde limón en los tratamientos 80 y 100 mg AgNPs L^{-1} (Figura 1E, G). Por otra parte, el lóbulo sumergido presentó zonas cafés y las raíces se tornaron de color café desde el tratamiento 1 mg AgNPs L^{-1} hasta 100 mg AgNPs L^{-1} (Figura 1D, F, H), principalmente aquellas raíces jóvenes y en crecimiento.

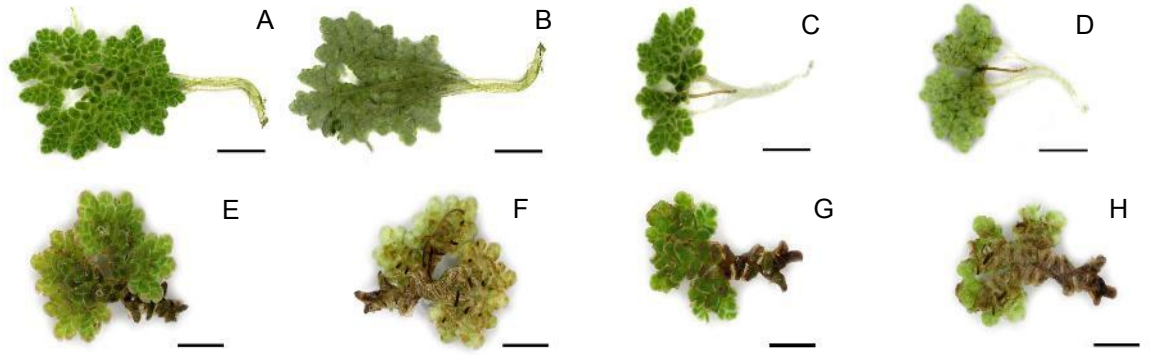


Figura 1. Morfología de los lóbulos flotantes (A, C, E y G) y sumergidos con raíz (B, D, F y H) de *A. filiculoides* después de 25 d de exposición en la solución nutritiva Yoshida y concentraciones crecientes de AgNPs. 0 mg AgNPs L^{-1} (A-B), 1 mg AgNPs L^{-1} (C-D), 80 mg AgNPs L^{-1} (E-F), 100 mg AgNPs L^{-1} (G-H). Barra: 5 mm.

El ápice de la raíz de *A. filiculoides* se tornó de color café conforme incrementaron las concentraciones AgNPs en la solución nutritiva, lo cual puede ser un indicador de la acumulación y toxicidad de las AgNPs (Geisler-Lee *et al*., 2013), dado que se afecta directamente su crecimiento y la nutrición del simbiosistema. Se ha reportado que las raíces expuestas a altas concentraciones de AgNPs, mejoran la síntesis de ácido indolacético (AIA), el cual inhibe el crecimiento de la raíz y los ápices de raíz se tornan de color café (Vishwakarma *et al*., 2017).

Las biomasas frescas y secas del simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* disminuyeron al incrementar las concentraciones de AgNPs en la solución nutritiva, después de 25 d de exposición en cada uno de los tres experimentos (Figura 2). En la biomasa fresca y seca, en la concentración menor estudiada, 1 mg AgNPs L^{-1}, hay una disminución de 25 y 23% con respecto al testigo, respectivamente (Figura 2A, B). Entre las concentraciones 80 y 100 mg AgNPs L^{-1} no existen diferencias significativas; sin embargo, estos disminuyen con respecto al testigo entre el 83 y 88% en la biomasa fresca (Figura 2B, C) y en 74 y 80%, en la biomasa seca (Figura 2E, F).

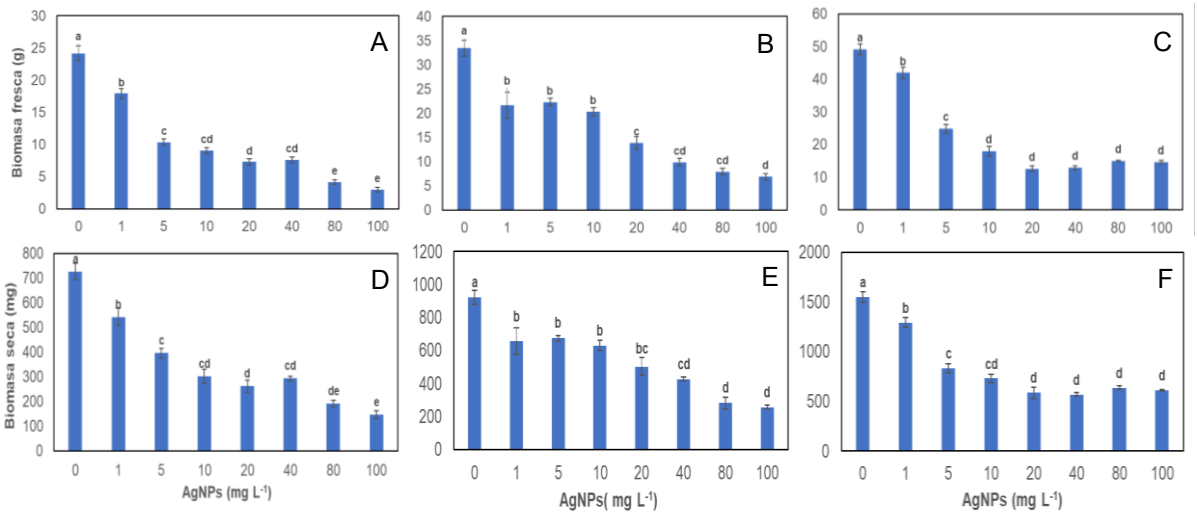


Figura 2. Biomasas fresca y seca en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs. Expto. 1 (A y D), Expto. 2 (B y E), Expto. 3 (C y F). Los datos son medias ± EE, letras diferentes sobre las barras, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$), n=5.

Las biomasas fresca y seca en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* disminuyeron conforme incrementaron las concentraciones de AgNPs, probablemente debido a la reducción de agua y disponibilidad de nutrientes. En plantas como *Arabidopsis thaliana* se ha reportado que las AgNPs pueden afectar el equilibrio del agua al cambiar la transcripción de genes en las acuaporinas y la transcripción de genes antioxidantes, disminuyendo el crecimiento de las plantas por la reducción en la absorción de agua y alteración del equilibrio entre los sistemas oxidante y antioxidante (Munir *et al*., 2023).

El contenido de clorofilas *a*, *b* y total disminuyó significativamente con respecto al testigo (Figura 3). En la clorofila *a*, en los tratamientos 5, 80 y 100 mg AgNPs L^{-1} se encontró un porcentaje mayor de disminución: 31, 27 y 35% respectivamente. En la clorofila *b* y total, en los tratamientos 5, 80 y 100 mg AgNPs L^{-1} se encontraron los porcentajes mayores de disminución, siendo 5 y 100 mg AgNPs L^{-1} dónde se alcanzó hasta 35%. Sin embargo, la relación clorofila a/clorofila *b* fue mayor en el tratamiento con 5 mg AgNPs L^{-1}. La relación clorofila total/carotenoides fue menor en los tratamientos 5, 80 y 100 mg AgNPs L^{-1} (Cuadro 1).

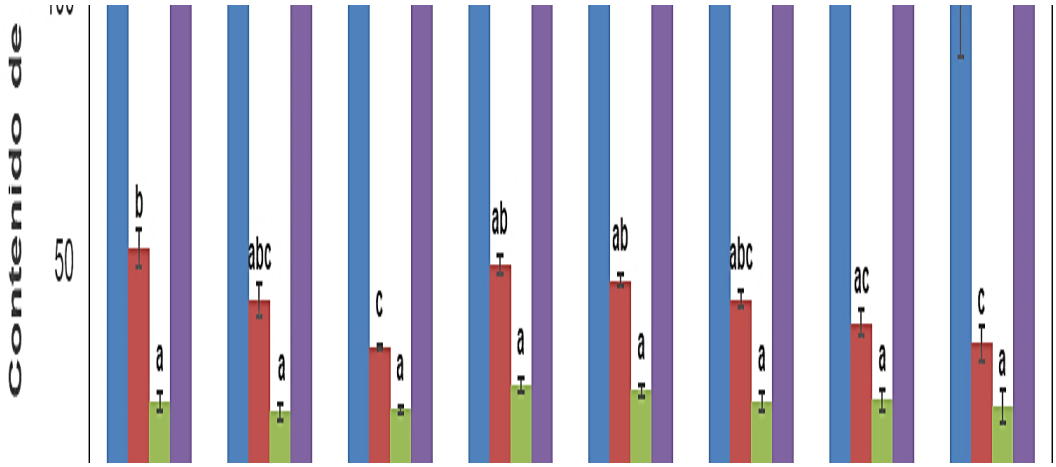


Figura 3. Contenido de pigmentos fotosintéticos en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* expuesto a concentraciones crecientes de AgNPs por 25 d. Los datos son medias ± EE, letras diferentes sobre las barras, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$), n=3. BF: Biomasa fresca.

Cuadro 1. Relaciones clorofila *a*/clorofila *b* y clorofila total/carotenoides en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* expuesto a concentraciones crecientes de AgNPs por 25 d.

Tratamientos (AgNPs mg L^{-1})	Relación Clorofila *a*/clorofila *b*				Relación Clorofila total/carotenoides			
0	2.94	±	0.05	ab	8.80	±	0.05	a
1	3.04	±	0.04	ab	7.96	±	0.21	b
5	3.18	±	0.07	b	6.41	±	0.11	de
10	2.88	±	0.06	a	7.21	±	0.12	bc
20	2.87	±	0.04	a	7.03	±	0.17	cd
40	2.85	±	0.06	a	7.05	±	0.19	cd
80	2.93	±	0.08	ab	6.34	±	0.12	de
100	2.89	±	0.07	ab	5.95	±	0.25	e

Los datos son medias ± EE. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$), n=3.

En las concentraciones 1, 10, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1}, el simbiosistema mantuvo la clorofila *a*, *b* y total, en niveles comparables al tratamiento testigo. Esta respuesta puede ser debida a la presencia de la cianobacteria *Anabaena azollae*, la cual es menos dependiente de su hospedero que otros diazótrofos, debido a la presencia de células especializadas (heterocistos) y mecanismos celulares para reducir la concentración de oxígeno en el citosol (Esteves-Ferreira *et al.*, 2017), puede proporcionar compuestos nitrogenados al helecho, permitiendo que las plantas continúen creciendo y mantengan capacidad fotosintética (Bujak & Bujak, 2024). En contraste, en el tratamiento de 100 mg AgNPs L^{-1} se encontraron los porcentajes mayores de disminución en el contenido de pigmentos fotosintéticos, por lo que su reducción puede estar relacionada no solo con la degradación, un proceso que ocurre durante la senescencia de las hojas, sino también con su síntesis. En esta investigación, la relación entre la clorofila *a* y clorofila *b* más alta (3.18) se alcanzó con 5 mg AgNPs L^{-1} (Cuadro 1), lo cual indica que el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* mitiga los efectos negativos causados por las AgNPs en esta concentración, en comparación con los tratamientos 10, 20, 40, 80 y 100 mg AgNPs L^{-1}. La relación de clorofila total/carotenoides fue significativamente reducida en el tratamiento con 100 mg AgNPs L^{-1} (Cuadro 1). Los valores bajos de esta relación, son un signo de senescencia, estrés y daño al sistema fotosintético (Uka *et al*., 2021).

Los resultados indicaron que la concentración de azúcares totales incrementó, alcanzado un máximo en la concentración de 20 mg AgNPs L^{-1} y posteriormente disminuyó en 54 y 70% con 80 y 100 mg AgNPs L^{-1}, respectivamente (Figura 4).

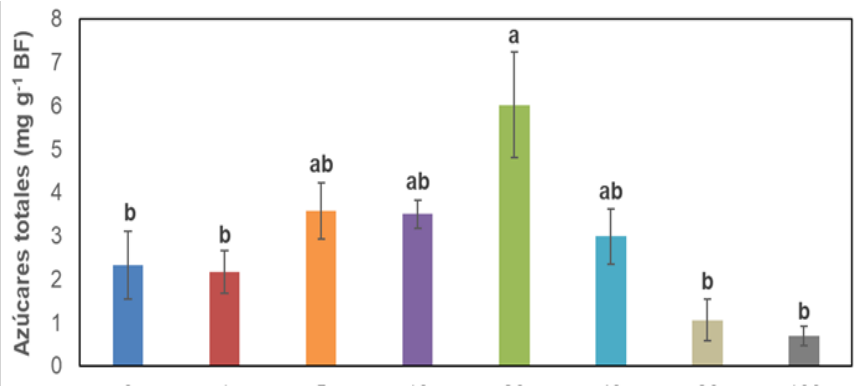


Figura 4. Concentración de azúcares totales en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* expuesto a concentraciones crecientes de AgNPs por 25 d. Los datos son medias ± EE, letras diferentes sobre las barras, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$), n=3. BF: Biomasa fresca.

Algunos carbohidratos son ajustadores osmóticos que permiten a las células mantener un equilibrio hídrico cuando las plantas estás estresadas. Investigaciones han demostrado que los iones Ag^{+} pueden alterar el equilibrio hídrico celular inhibiendo la actividad de las acuaporinas (Singh et al., 2020). Lo anterior puede indicar que las AgNPs causaron un desequilibrio hídrico, por lo que las células generaron más carbohidratos como ajustadores osmóticos para proteger al simbiosistema. Sin embargo, en la concentración más alta de AgNPs (100 mg AgNPs L^{-1}), la fotosíntesis de las plantas disminuyó, causando una pérdida de carbohidratos. Resultados similares fueron reportados en *Spirodela polyrhiza* expuesta a AgNPs (Jiang *et al*., 2012).

Por otra parte, los resultados indicaron que la actividad antioxidante incrementó con respecto al testigo, alcanzado un máximo en la concentración de 10 mg AgNPs L^{-1}. Particularmente, aunque no existen diferencias significativas entre los tratamientos 10, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1}, se observa un incremento de poco más del 70% con respecto al testigo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Actividad antioxidante a los 15, 30 y 60 min en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* expuesto a concentraciones crecientes de AgNPs por 25 d.

AgNPs (mg L^{-1})	15 min				30min				60 min			
	(mg g^{-1} BF)											
0	0.41	±	0.05	c	0.41	±	0.05	c	0.38	±	0.06	c
1	0.44	±	0.05	bc	0.43	±	0.05	bc	0.40	±	0.05	bc
5	0.57	±	0.07	bc	0.57	±	0.07	bc	0.55	±	0.07	bc
10	0.93	±	0.03	a	0.95	±	0.03	a	0.95	±	0.04	a
20	0.72	±	0.09	ab	0.73	±	0.10	ab	0.72	±	0.10	ab
40	0.72	±	0.10	ab	0.73	±	0.10	ab	0.72	±	0.11	ab
80	0.54	±	0.04	bc	0.54	±	0.04	bc	0.52	±	0.04	bc
100	0.46	±	0.02	bc	0.47	±	0.02	bc	0.46	±	0.02	bc

Los datos son medias ± EE. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$), n=3. BF: Biomasa fresca.

Con respecto a la actividad antioxidante, el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* muestra actividad antioxidante ante la exposición de las AgNPs. En plantas acuáticas como *Egeria densa* y *Juncus effusus* mejoran su tolerancia al estrés oxidativo producido por las AgNPs al aumentar la actividad de enzimas antioxidantes como la peroxidasa (POD) y superóxido dismutasa (SOD) para eliminar las especies reactivas de oxígeno (ROS), protegiendo así a las células del daño oxidativo (Yuan et al., 2018). En *Lemna minor* la peroxidasa de guayacol (GPx) y la glutatión-S-transferasa (GST) fueron inducidos por las AgNPs conjugadas con citrato y PVP, como mecanismo de defensa antioxidante (Pereira *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES

El análisis anterior revela que las AgNPs en altas concentraciones tienen efectos negativos en parámetros de crecimiento e interacciones bioquímicas, en particular aquellos relacionados con el estatus fisiológico: reducción de peso en fresco, peso de materia seca, disminución del contenido de pigmentos fotosintéticos, concentración de azúcares totales y actividad antioxidante.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Esteves-Ferreira, J. H. F. Cavalcanti, M. G. M. V. Vaz, L. V. Alvarenga, A. Nunes-Nesi, W. L. Araújo, “Cyanobacterial nitrogenases: Phylogenetic diversity, regulation and functional predictions”, Genet. Mol. Biol., Vol. 40, 1, 2017, pp. 261-275.
2. A. López-Herrera, F. C. Gómez-Merino, H. A. Zavaleta-Mancera, M. Avalos-Borja, J. R. García-Nava, L. I. Trejo-Téllez, “Effect of silver nanoparticles (AgNPs) on aquatic and wetland plants”, Environments, Vol. 11, 12, 2024, 297.
3. A. López-Herrera, M. Avalos-Borja, J. R. García-Nava, L. I. Trejo-Téllez, A. Alarcón, A. Patrón-Soberano, V. Conde-Martínez, H. A. Zavaleta-Mancera, “Interaction of silver nanoparticles with the aquatic fern *Azolla filiculoides*: Root structure, particle distribution, and silver accumulation”, J. Nanopart. Res., Vol. 23,13, 2021, 297.
4. A. Noori, “Silver nanoparticles in plant health: Physiological response to phytotoxicity and oxidative stress”, Plant Physiol. Biochem., Vol. 209, 2024, 108538.
5. A. Oukarroum, L. Barhoumi, L. Pirastru, D. Dewez, “Silver nanoparticle toxicity effect on growth and cellular viability of the aquatic plant *Lemna gibba*”, Environ. Toxicol. Chem., Vol. 32, 4, 2013, pp. 902-907.
6. H. Jiang, M. Li, F. Chang, W. Li, L. Yin, “Physiological analysis of silver nanoparticles and $AgNO_3$ toxicity to *Spirodela polyrhiza*”, Environ. Toxicol. Chem., Vol. 31, 8, 2012, pp. 1880-1886.
7. J. Bujak, A. Bujak, “Origin and evolution of the *Azolla* superorganism”, Plants, Vol. 13, 15, 2024, 2106.

8. J. Geisler-Lee, Q. Wang, Y. Yao, W. Zhang, M. Geisler, K. Li, Y. Huang, Y. Chen, A. Kolmakov, X. Ma, “Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*”, Nanotoxicol., Vol. 7*,* 3, 2013, pp. 323-337.
9. K. Vishwakarma, Shweta, N. Upadhyay, J. Singh, S. Liu, V. P. Singh, S. M. Prasad, D. K. Chauhan, D. K. Tripathi, S. Sharma, “Differential phytotoxic impact of plant mediated silver nanoparticles (AgNPs) and silver nitrate ($AgNO_3$) on *Brassica* sp.”, Front. Plant Sci., Vol. 8, 2017, 1501.
10. L. Yuan, C. J. Richardson, M. Ho, C. W. Willis, B. P. Colman, M. R. Wiesner, “Stress responses of aquatic plants to silver nanoparticles”, Environ. Sci. Technol., Vol. 5, 2018, pp. 2558-2565.
11. N. Munir, W. Gulzar, Z. Abideen, M. Hasanuzzaman, A. El-Keblawy, F. Zhao, “Plant–nanoparticle interactions: Transcriptomic and proteomic insights”, Agron., Vol. 13, 8, 2023, 2112.
12. P. Szczyglewska, P., A. Feliczak-Guzik, I. Nowak, “Nanotechnology-General Aspects: A chemical reduction approach to the synthesis of nanoparticles”, Molecules, Vol. 28, 2023, 4932.
13. R. K. Singh, R. Deshmukh, M. Muthamilarasan, R. Rani, M. Prasad.”, Versatile roles of aquaporin in physiological processes and stress tolerance in plants”, Plant Physiol. Biochem., Vol. 149, 2020, pp. 178-189.
14. S. P. P. Pereira, F. Jesus, S. Aguiar, R. De Oliveira, M. Fernandes, J. Ranville, A. J. A. Nogueira, “Phytotoxicity of silver nanoparticles to *Lemna minor*: Surface coating and exposure period-related effects”, Sci. Total Environ., Vol. 618, 2018, 1389-1399.
15. S. Yoshida, D. Forno, J. Cock, K. Gómez, “Laboratory manual for physiological studies of rice”. 3ra ed. The International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 1976, 83 p.
16. U. N. Uka, E. J. D. Belford, F. A. Elebe, “Effects of road traffic on photosynthetic pigments and heavy metal accumulation in tree species of Kumasi Metropolis, Ghana”, SN Appl. Sci., Vol. 3, 1, 2021, 131.

CARACTERIZACIÓN DE VINAZA DE AGAVE Y SELECCIÓN DE MICROORGANISMOS CON POTENCIAL BIODEGRADADOR PARA SU TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Ricardo Omar Fernández Hernández[1], Katarzyna Wrobel1, Kazimierz Wrobel[1], Armando Alcazar Magaña[2], Juan Manuel Peralta Hernández[1] y Alma Rosa Corrales Escobosa[1]

[1] Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, [2]The University of British Columbia.
ro.fernandezhernandez@ugto.mx.

RESUMEN

La vinaza de agave es un subproducto líquido de la industria del tequila (generando ~10 L por cada litro de tequila), que presenta alta carga orgánica, acidez y compuestos recalcitrantes que pueden impactar negativamente el suelo y los ecosistemas acuáticos si se descargan directamente al ambiente. Para abordar este problema, es fundamental desarrollar estrategias de tratamiento eficientes. Una de las alternativas más prometedoras es la biodegradación mediada por microorganismos, lo que hace esencial la caracterización de la vinaza. El objetivo del trabajo fue realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la vinaza para identificar microorganismos nativos, con potencial biorremediador contribuyendo al cumplimiento de la NOM 001-SEMARNAT-2021. Para ello, se realizó la caracterización de la vinaza proveniente de una tequilera local de Pénjamo, Gto., evaluando parámetros como pH (4.03); conductividad (4172 ± 249 µScm $^{-1}$); demanda química de oxígeno (44145 ± 760 mgL^{-1}); nitrógeno total de 243 mgmL^{-1}; compuestos fenólicos (720 eq AG mgL-1); mientras el análisis de metales por MP-AES indicó que contenía 558 ± 44, 620 ± 35, 122 ± 9, 107 ± 8, 1.4 ± 0.1, 0.10 ± 0.07 y 0.198 ± 0.02 mgmL-1 de Ca, K, Na, Mg, Fe, Cu y Zn respectivamente. Todos estos resultados indicaron que la vinaza no cumple con la NOM-001-SEMARNAT-2021, por lo que se requiere llevar a cabo un tratamiento. Por otra parte, se obtuvieron microorganismos nativos mediante enriquecimiento en vinaza sin suplementos y tolerantes a los compuestos como fenoles presentes. Los microorganismos aislados (3 cepas) fueron identificados mediante la técnica MALDI Biotyper® como Lactobacillus brevis Kluyveromyces marxianus y Pichia manshurica. Adicionalmente, seinició con la evaluación de la capacidad de crecimiento en vinaza de hongos filamentososcomo Talaromyces sp y Trichoderma harzianum con el fin de utilizarla como medio decultivo para la producción de estos microorganismos, observándose que estos hongosfilamentosos pueden tolerar y crecer en 100 % de vinaza. La caracterización fisicoquímicay microbiológica proporcionan información básica para avanzar en el desarrollo deherramientas biotecnológicas enfocadas al tratamiento sostenible de residuos agroindustriales.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país son producidos 7 diferentes destilados a partir de plantas de agave, contando 4 de ellos con denominación de origen, entre los que destaca el Tequila. El Tequila es una bebida alcohólica regional y de reconocimiento internacional que se produce a partir de la fermentación y destilación de los azúcares extraídos de las cabezas o piñas de la planta de *Agave tequilana* Weber variedad azul. En la actualidad, el cultivo del Agave azul y la exportación del Tequila representa una de las más importantes actividades del sector agroalimentario en nuestro país. En los últimos 10 años el promedio de la producción anual de agave tequilero asciende a 1 583 000 toneladas, siendo Jalisco el principal productor con el 76.6 % de la producción nacional, seguido por Guanajuato, Nayarit, Michoacán y Tamaulipas que en conjunto aportan el 23.4 %. Se estima que en el 2020 México exporto aproximadamente 308.6 millones de litros de Tequila, siendo USA el principal comprador con el 90 % de las exportaciones totales.

En la figura 1 se muestra el crecimiento en la producción anual total de Tequila en la última década, la cual, tuvo un máximo en el año 2023 y después de una disminución en el año 2024 ha tenido un importante repunte en lo que va del 2025. Según datos de Grand View Research el valor de la

industria tequilera asciende a más de 11 millones de dólares y se proyecta que para el 2030 su valor aumente a casi 20 millones de dólares, manteniéndose como una de las más importantes del sector agroindustrial.

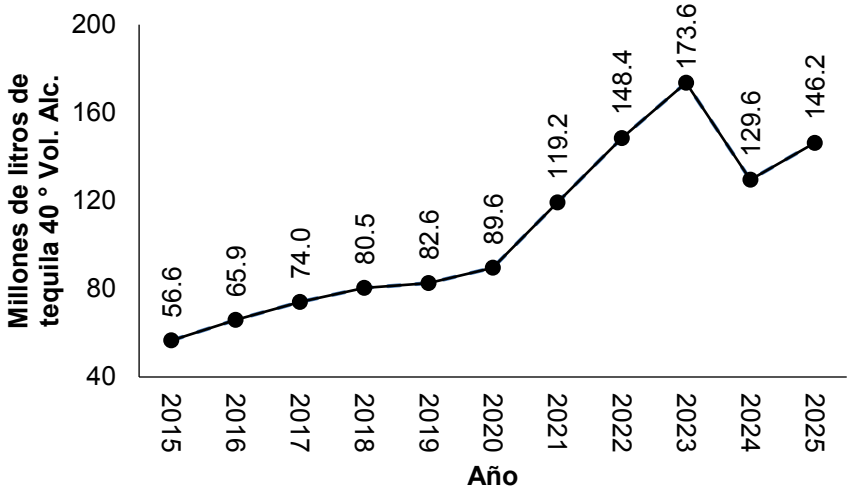


Figura 1. Producción anual total de Tequila (CRT, Consejo Regulador del Tequila A. C., 2025)

En el año 2016 el Consejo Regulador del Tequila A.C. (CRT), junto con el Centro Mario Molina y la agroindustria tequilera, desarrollaron la Estrategia de Sustentabilidad para la Cadena Productiva Agave Tequila con metas establecidas a realizarse entre los años 2025 y 2030. Entre las metas propuestas para el 2030 se encuentran disminuir en un 25 % las emisiones de CO_2 por litro de Tequila producido, aumentar en un 12 % el uso de energía de origen renovable y en un 5 % la energía eléctrica renovable, disminuir el consumo de agua en un 15 % por unidad de producción e incrementar en un 80 % la cantidad de agua tratada.

El desarrollo del presente trabajo pretende contribuir con la Estrategia de Sustentabilidad de la industria tequilera, enfocándose en la caracterización, tratamiento y reutilización de uno de los principales residuos generados durante el proceso de producción de Tequila, la vinaza.

Vinaza de Tequila

El residuo líquido generado durante el proceso destilación del Tequila y otros licores se conoce como vinaza. Este residuo es caracterizado por poseer una alta carga de materia orgánica y se constituye principalmente por partículas sólidas suspendidas, levaduras y alcoholes superiores [1]. Es conocido que, por cada litro de Tequila producido, se producen entre 10-12 L de vinazas [2]. En general, la vinaza de Tequila (VT) está compuesta aproximadamente en un 95 % por agua, presenta un alto contenido de sólidos suspendidos y materia orgánica, posee un pH ácido (entre 3 y 4) y un color marrón oscuro [3].

En la última década, la producción total anual de Tequila ha tenido un crecimiento importante, como consecuencia de la inversión extranjera en la Industria Tequilera. Se estima que 8 de cada 10 L de Tequila producidos en el país son consumidos en el extranjero, siendo EUA el principal consumidor. El incremento acelerado en la producción de esta bebida trae como consecuencia un aumento en la cantidad de residuos generados, lo cual, a su vez, representa un reto para el tratamiento y disposición de dichos residuos.

La industria del Tequila es uno de los principales productores de aguas residuales en el estado de Jalisco, México, con un estimado de 2,645,655.70 m^3año^{-1}. En México, las VT se eliminan con frecuencia sin tratamiento directamente en cuerpos de agua o se utilizan como enmienda del suelo

o fertilizante, y en menor medida, para producir biogás por digestión anaeróbica [4]. Aproximadamente el 80% de las VT generadas se vierten directamente a cuerpos acuáticos (ríos, arroyos, lagos, embalses), sistemas de alcantarillado municipales o directamente al suelo sin recibir tratamiento adecuado [2]. Por medio de una encuesta realizada a micro, pequeños, medianos y grandes productores de Tequila, Zurita y col. en el 2022, encontraron que el 28.6 % de las empresas reconocen que no brindan ningún tratamiento a las vinazas, mientras que el 52.4 % solo enfrían y ajustan el pH a un valor alrededor de 7, y tan solo el 27.3 % de las empresas dan un tratamiento completo a las vinazas, siendo las pequeñas y microempresas aquellas que normalmente no llevan a cabo ningún tratamiento para este residuo, disponiendo normalmente de este, mediante la fertiirrigación. En el mismo estudio se identificaron dos regiones principales como productoras de vinaza de Tequila en el estado (región Valle y Altos Sur), siendo en la región del Valle una práctica común la disposición de la vinaza sobre aguas superficiales, así como los vertimientos en el sistema de alcantarillado [5].

Diversos estudios han demostrado que la disposición de estos residuos sin previo tratamiento puede resultar altamente perjudicial para el ambiente. En el suelo, es capaz de deteriorar la estructura del este, al aumentar su fitotoxicidad por el aumento en la concentración de sustancias como el ácido acético, ácido láctico, glicerol y nitrógeno amoniacal, puede reducir la porosidad del suelo generando zonas anaeróbicas e inhibir la capacidad de germinación de semillas por la presencia de fenoles [6]. Por otro lado, gracias a su elevada concentración de materia orgánica y nutrientes puede favorecer la eutrofización de cuerpos acuáticos, disminuyendo la concentración de oxígeno disuelto afectando a los organismos que viven en ellos [7]. Además, la alta temperatura y acidez de las vinazas crean un ambiente hostil los seres vivos [8]. Por otro lado, se ha reportado que el color marrón y la turbidez de las vinazas pueden afectar la penetración de la luz, reduciendo la presencia de organismos fotosintéticos [1].

En el 2023 en un estudio realizado por Tejeda A. y col., se evaluó la posible contaminación por vinaza de Tequila de los arroyos Atizcoa y Jarritos en el municipio de Tequila, Jalisco, México. Se observo una correlación lineal entre los niveles de vinaza y de DQO, sólidos suspendidos totales y turbidez. Los valores obtenidos en diferentes puntos de monitoreo para estos parámetros indican que ambos arroyos son utilizados como sitios de disposición final para este residuo. Sumado a esto, se observó una abrumadora disminución en parámetros importantes para el desarrollo de vida acuática como el pH y el oxígeno disuelto [9].

De acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería, las vinazas no cumplen con los parámetros ambientales para ser descargadas directamente. Sin embargo, mediante el empleo de diferentes tecnologías de tratamientos de aguas residuales se puede disminuir su potencial toxicidad. Dicho lo anterior, es importante subrayar la necesidad de evaluar e integrar sistemas de tratamiento alternativos, que permitan reducir la contaminación y proteger el medio ambiente local.

En febrero del 2023, el CTR presentó el consorcio de investigación por la sustentabilidad del Agave Tequila. Este consorcio tiene como objetivo coordinar las investigaciones que las universidades, centros de investigación y centros de innovación realizan en torno al Tequila, para generar prácticas e innovaciones tecnológicas que permitan a esta cadena productiva cumplir con sus objetivos de sostenibilidad.

En consorcio pueden participar todos aquellos proyectos que estén relacionados con temas ambientales, sociales y económicos como lo son: a) La no deforestación, b) Planeación estratégica del agave, c) La captura de carbono por agave, d) Prácticas agrícolas sustentables, e) La reutilización de bagazo y f) El tratamiento de vinazas.

Revalorización de la VT

En la actualidad, los modelos de bioeconomía circular pretenden integrar la recuperación biológica de recursos orgánicos y nutrientes a partir de los residuos provenientes de diversas industrias. En este entendido, la VT presenta un alto potencial para su reutilización mediante la aplicación en biotecnología, especialmente como medios nutritivos en fermentaciones con microorganismos, la obtención de metabolitos de interés y la generación de biomasa con alto valor para la producción de alimento para ganado y generación de biocombustibles [4][10][11].

Díaz Vázquez y col. en 2022, describe el modelo de bioeconomía circular aplicado a residuos agroalimentarios. En este modelo se prioriza la reutilización de los desechos y su revalorización para la obtención de subproductos con valor agregado. Los productos obtenidos se dividen en material recuperado de alto valor (biomasa microbiológica, enzimas y metabolitos secundarios), material recuperado de bajo valor (compost y fertilizantes) y material recuperado para generación de energía (metano, hidrogeno, etanol, biodiesel y material combustible) [4].

En 2010, Aguilar y col. utilizaron vinaza y bagazo de caña de azúcar para evaluar la posibilidad de obtener enzimas lignocelulíticas a partir de hongos (*Pleorotus y Trichoderma reesei*), encontrando alta actividad para enzimas lacasa y manganeso-peroxidasas [12]. En 2020, Cea Barcia y col. utilizaron muestras de VT diluidas para la obtención de biomasa de levaduras y microalgas con interés en acuacultura, obteniendo los mejores resultados en concentraciones de vinaza < 10 % v/v y enriquecidas con $(NH_4)_2SO_4$ como fuente de nitrógeno [13]. Jayasekara y col. encontraron, al evaluar diferentes microorganismos, que el co-cultivo entre hongos lignocelulíticos y levaduras fermentadoras representan una alternativa interesante para la producción de bioetanol a partir de bagazo y vinaza de caña de azúcar. Sin embargo, en ese mismo estudio, los autores destacan la importancia de la optimización del proceso [14]. Díaz Vázquez y col. estudiaron la factibilidad de emplear la vinaza de Tequila como sustrato para el cultivo de levaduras de alto valor nutritivo con fines de uso como alimento en ganadería obteniendo resultados prometedores y disminuyendo a su vez, la DQO en un 33.3 ± 3.5 %, el contenido de nitrógeno en un 85.0 ± 8.7 % y la carga de fósforo en 54.1 ± 2.5 % [4]. Torres M. y col. en 2023 realizaron co-cultivos de *Trichoderma harzianum* y *Pseudomonas caboferrum* o *Rizobio* sp. en vinaza de caña de azúcar, obteniendo una biomasa fúngica tres veces mayor a la obtenida en un medio estándar. Mientras que las vinazas residuales después del cultivo presentaron pH casi neutro y menores conductividades y toxicidad que la vinaza cruda. El tratamiento directo de suelos con esta vinaza residual propició condiciones menos perjudiciales que la vinaza sin tratar [15].

Considerando lo anterior, en este trabajose propone utilizar a los subproductos de la destilación de agave denominadas “vinazas”, con el fin de proponer estrategias que permitan el tratamiento y/o aprovechamiento biotecnológico con la finalidad de reducir su impacto en el medio ambiente y contribuir en la economía circular de la producción de Tequila.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestras

Las muestras de vinaza de Tequila (VT) fueron proporcionadas amablemente por una Tequilera ubicada en el municipio de Pénjamo, Guanajuato. Se recolectaron aproximadamente 20 L de vinaza en un bidón de PET. La toma de muestra se realizó directamente en la salida de la tubería de desecho de vinaza, la cual vierte su contenido en un sistema de canaletas metálicas que la conducen hacia tanques de almacenamiento, permitiendo así disminuir su temperatura para su posterior tratamiento y disposición. Una vez en el laboratorio se separó la VT en alícuotas y estas se almacenaron en distintas condiciones, según fuera requerido para su posterior análisis.

Caracterización fisicoquímica de VT

Para la caracterización fisicoquímica de la VT se midieron diferentes parámetros como: demanda química de oxígeno total (DQO T), demanda química de oxígeno de fracción soluble (DQO L), demanda química de oxígeno de sólidos suspendidos (DQO S), pH, conductividad eléctrica (CE), color verdadero (CV), solidos totales (ST), suspendidos (SS), volátiles totales (SVT), suspendidos volátiles (SSV) y disueltos (SDT) de acuerdo con los métodos descritos en la NOM (Tabla 1). La concentración de compuestos fenólicos (CF) por el método Folin-Ciocalte, concentración de azúcar/sacarosa (CAz), concentración de nitrógeno amoniacal (NH_3), concentración de cloruros (Cl^-) y concentración de metales (Ca, Na, K, Mg, Fe, Cu, Zn) por MP-AES (Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma de Microondas)

Evaluación de microorganismos con potencial para el tratamiento biológico de VT concentrada

Se utilizaron muestras de VT previamente congeladas y almacenadas a -20 °C durante 6 meses. Las muestras se descongelaron a 4 °C y se filtró aproximadamente 1 L de vinaza utilizando filtros de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 45 µm, para eliminar los sólidos suspendidos. Posteriormente, la vinaza fue esterilizada en autoclave a 120 ± 5 °C durante 15 minutos y se transfirieron alícuotas de 50 mL a matraces Erlenmeyer de 125 mL, previamente esterilizados.

Los microorganismos seleccionados fueron *Pichia manshurica aislada de vinaza*, *Candida krusei* aislada de un preinóculo de fermentación y *Trichoderma harzianum* cepa comercial con actividad lignocelulítica. Los microorganismos fueron identificados utilizando MALDI Biotyper®.

El diseño experimental consistió en 5 tratamientos por duplicado.

- Control sin la adición de microorganismos,
- *P. manshurica*,
- *C. krusei*
- *T. harzianum*,
- Consorcio *P. manshurica* y *C. krusei*.
-

Para *P. manshurica* y *C. krusei* se preparó un preinoculo, dejándolos crecer en medio líquido YPG (20 mL) a 28 °C durante dos días. Posteriormente se transfirió el medio a tubos falcón de 50 mL estériles y se centrifugaron a 2500 rpm durante 5 min. Se eliminó el medio de cultivo y se realizaron dos lavados de la pastilla con 20 mL de agua estéril. Se resuspendió la pastilla en aproximadamente 5 mL de agua estéril y se realizó un conteo en cámara de Neubauer.

En el caso de *T. harzianum* se recolectaron esporas de un cultivo previo, filtrando con filtros estériles para eliminar el micelio, posteriormente centrifugando a 2500 rpm durante 5 min. Se eliminó el medio de cultivo y se realizaron dos lavados de la pastilla con 20 mL de agua estéril. Se resuspendió la pastilla en aproximadamente 5 mL de agua estéril y se realizó un conteo en cámara de Neubauer. Se inocularon los matraces con una concentración inicial aproximada de 1×10^6 células mL^{-1} y se incubaron a 28 °C durante 21 días, manteniendo una agitación constante de 150 rpm. Se tomaron muestras de 2 mL, en condiciones de esterilidad, los días 3, 7, 10, 14, 17 y 21. Las muestras se centrifugaron a 10000 x g, 1.5 mL del sobrenadante se transfirieron a tubos Eppendorf de 1.7 mL y se congeló a -20 °C para su posterior análisis.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica de VT

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo de la caracterización fisicoquímica de la VT comparados con los límites permisibles corresponden a los indicados para valor inmediato medido en aguas residuales dispuestas para riego en la “NOM-001-SEMARNAT-

2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación". Los resultados indican que la muestra de VT analizada no cumple con la normativa mexicana para su disposición sin tratamiento previo.

Una de las principales características de la VT es el pH ácido, el cual se ha asociado principalmente a la presencia de ácidos orgánicos producidos durante el proceso de fermentación. El color marrón oscuro de las vinazas es comúnmente asociado a la presencia de melanoidinas formadas por la reacción de Millard entre los azucares y aminoácidos presentes, la cual es favorecida por las condiciones de temperatura y acidez durante el proceso de destilación. La relación entre ST y SVT permite concluir que la mayoría de los sólidos presentes corresponden a la presencia de compuestos orgánicos, lo cual se confirma con el alto valor reportado para el DQO de los sólidos suspendidos. El valor de DQO total indica de igual manera, la presencia de una gran cantidad de materia orgánica. La concentración de metales como Cu y Zn se encuentran por debajo del límite permisible, mientras que la concentración de Ni se encuentra por debajo del límite de detección para el método empleado.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de la muestra de VT

Parámetro medido	Valor obtenido			Unidades	Límite permisible*	Unidad	Metodología empleada
DQO L	38.84	±	1.60	g L^{-1}	NC	--	Kolb y col. (2017)
DQO S	3.82	±	0.16	g L^{-1}	NC	--	
DQO T	42.66	±	1.75	g L^{-1}	0.21	g L^{-1}	
pH	4.03	±	0.04	--	6-9	--	NMX-AA-008-SCFI-2016
CE	4.17	±	0.25	mS cm^{-1}	NC	--	NMX-AA-093-SCFI-2000
CV						--	NMX-AA-017-SCFI-2021
α(436)	127.3	±	1.5	m^{-1}	7.0	m^{-1}	
α(525)	26.5	±	0.8	m^{-1}	5.0	m^{-1}	
α(620)	6.7	±	0.8	m^{-1}	3.0	m^{-1}	
ST	33.78	±	0.77	g L^{-1}	NC	--	NMX-AA-034-SCFI-2015
SS	29.97	±	0.72	g L^{-1}	0.14	g L^{-1}	
SVT	3.48	±	0.01	g L^{-1}	NC	--	
SSV	3.41	±	0.01	g L^{-1}	NC	--	
SDT	30.30	±	0.75	g L^{-1}	NC	--	
CF	0.56	±	0.01	g L^{-1}	NC	--	NMX-AA-050-SCFI-2001
CAz	3.0	±	0.1	° Bx	NC	--	NMX-F-436-SCFI-2011
Ca	0.56	±	0.04	g L^{-1}	NC	--	MP-AES
K	0.62	±	0.04	g L^{-1}	NC	--	
Na	0.12	±	0.01	g L^{-1}	NC	--	
Mg	0.11	±	0.01	g L^{-1}	NC	--	
Fe	1.46	±	0.14	mg L^{-1}	NC	--	
Cu	0.10	±	0.01	mg L^{-1}	1.5	mg L^{-1}	
Zn	0.20	±	0.02	mg L^{-1}	20	mg L^{-1}	
Ni	<0.01	±	--	mg L^{-1}	4	mg L^{-1}	

Límites permisibles según la NOM-001-SEMARNAT-2021; NC: no considerado en la norma; Conductividad eléctrica (CE); Color verdadero (CV); solidos totales (ST), suspendidos (SS), volátiles

totales (SVT), suspendidos volátiles (SSV) y disueltos (SDT); Concentración de compuestos fenólicos (CF); Concentración de azúcar/sacarosa (CAz); Demanda química de oxígeno total (DQO T); Demanda química de oxígeno de fracción soluble (DQO L), demanda química de oxígeno de sólidos suspendidos (DQO S).

Evaluación de la capacidad microorganismos para el tratamiento de Vinaza de Tequila

Para evaluar el efecto que tiene el crecimiento de los microorganismos sobre la VT se evaluaron diferentes parámetros como cambios en el perfil de picos del espectro UV-Vis (200-500 nm), pH, concentración de compuestos fenólicos, azucares totales y nitrógeno amoniacal, además de la disminución de DQO al final del experimento. En la figura 2 se muestra el espectro UV-Vis de una muestra de VT, la cual fue previamente filtrada y diluida 20 veces en agua desionizada. La lectura se obtuvo utilizando una celda de cuarzo con un paso óptico de 10 mm. La VT es una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre las principales señales observadas en el espectro UV-Vis obtenido se encuentran los picos de absorción por debajo de 250 nm, en estas longitudes de onda absorben una gran variedad de compuestos inespecíficos (como acido orgánicos, azucares, etc.). El pico de absorción cercano a los 280 nm es comúnmente asociado a la presencia de compuestos fenólicos, por otro lado, compuestos como el furfural, 5-metilfurfural y 2-acetilfurano, cuya presencia ha sido reportada previamente en muestras de VT también absorben a esta longitud de onda [16].

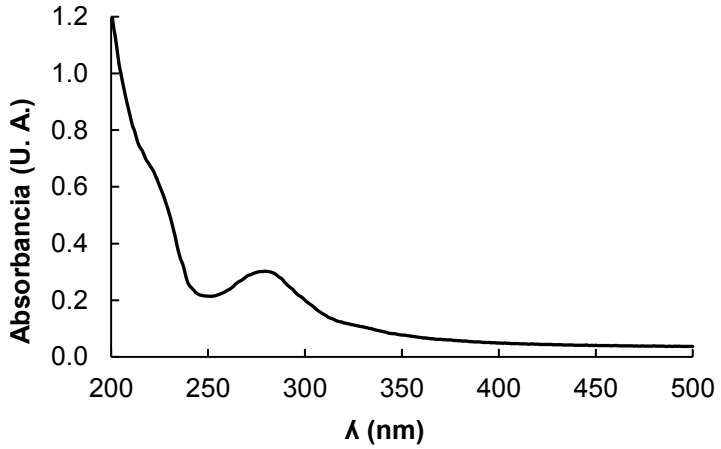


Figura 2. Espectro UV-Vis obtenidos de región de λ de 200 a 500 nm en la muestra de vinaza

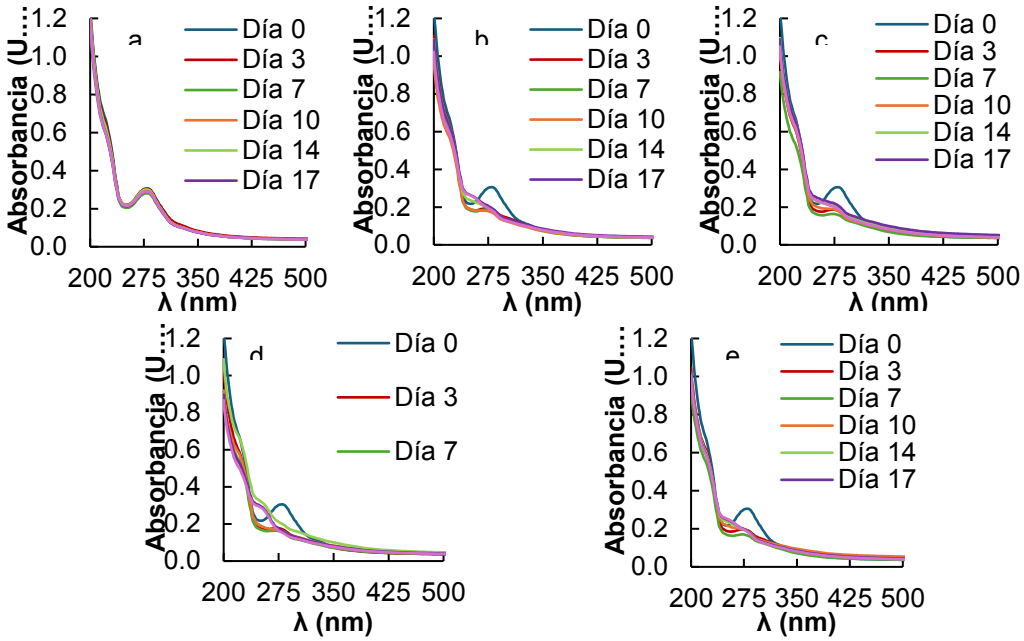


Figura 3. Típicos espectros UV-Vis obtenidos de región 200 a 500 nm adquirido a lo largo de 21 días de los cultivos en vinaza e inoculadas con los microorganismos a. a) Control; b) P. manshurica; c) C. krusei; d) T. harzianum; e) P. manshurica y C. krusei

En la figura 3 se presentan los espectros UV- Vis (200-500 nm) obtenidos al analizar las muestras obtenidas a lo largo del experimento para cada tratamiento. El espectro del control no presenta cambios a lo largo del tiempo, ni tampoco crecimiento de microrganismos, mientras que los tratamientos con microorganismos presentan cambios en todas las ocasiones. Como fue mencionado anteriormente, el principal pico de absorción se encuentra a 280 nm, en las figuras 3b-e se observa la disminución de esta señal, llegando a desaparecer prácticamente al día 3 del experimento y posteriormente permaneciendo constante, en todos los casos. Al realizar un análisis más detallado (Figura 4) podemos observar que, si bien todos los microorganismos disminuyen la intensidad de dicha señal, *T. harzianum* presenta la mayor disminución hacia el final del experimento. Por otro lado, puede observarse la aparición de una señal una señal a 250 nm la cual presenta una disminución en los primeros días y posteriormente aumenta, mostrando una tendencia similar en todos los tratamientos, pero con un mayor cambio en el tratamiento para *T. harzianum.* Lo anterior

indica una posibilidad de que ambas señales se encuentren relacionadas. Los resultados obtenidos indican que los microorganismos empleados podrían degradar compuestos fenólicos y/o furfurales.

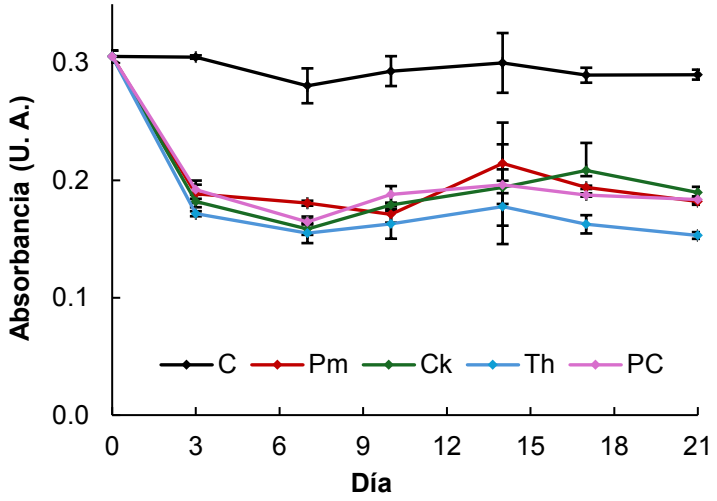


Figura 4. Cambios en la intensidad de la señal de absorbancia a 280 nm a lo largo del tiempo por acción de microorganismos. C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

Para la determinación de pH se utilizó un medidor de pH YIERYI® YY-1030, previamente calibrado. Se tomo la medición sumergiendo el electrodo en la muestra de medio de cultivo previamente centrifugada y enjuagando con agua desionizada entre medición y medición. Los resultados se muestran en la figura 5. En todos los casos se considera como pH inicial al pH de la vinaza previamente esterilizada, la misma que fue utilizada como medio de cultivo en el experimento. Nuevamente los tratamientos que involucran el uso de microorganismos presentan cambios observando su mayor variación entre las mediciones realizadas los días 7 y 10 del experimento, mientras que el control permanece constante. Los valores máximos de pH alcanzado son: 5.87 para *P. manshurica* 7.08 para *C. krusei* y 8.09 para *T. harzianum* y 7.19 para la mezcla de *P. manshurica* y *C. krusei.* El pH de la vinaza tratada con *P. manshurica* y *C. krusei* parece mantenerse estable después del día 10, mientras que el aumento del pH de la vinaza tratada con *T. harzianum* se mantiene, aunque con una pendiente menos pronunciada, aun al día 21. Se propone como una explicación del aumento de pH la generación de nitrógeno amoniacal consecuencia del metabolismo de proteínas por parte de los hongos usados, así como la disminución de la concentración de ácidos orgánicos presentes en la muestra.

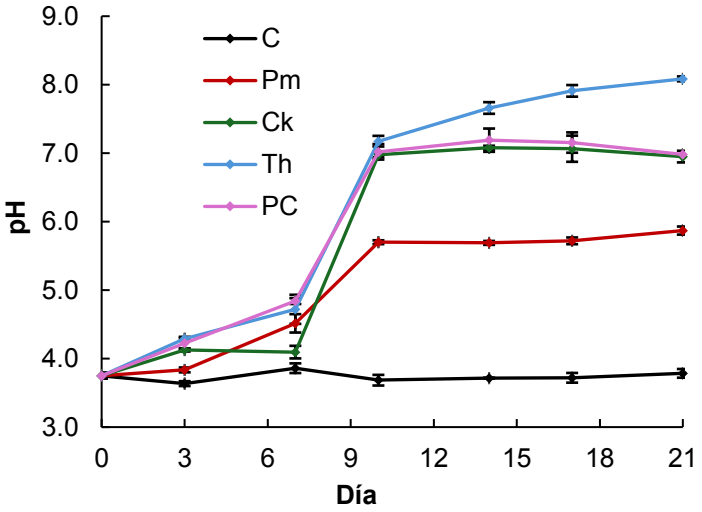


Figura 4. Cambios en el valor de pH a lo largo del tiempo de incubación de microorganismos en vinaza de Tequila. Tratamientos: C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

El análisis de la concentración de compuestos fenólicos se realizó por medio la reacción entre los fenoles presentes y el reactivo de Folin-Ciocalteu, en medio básico que genera un complejo azul cuantificable a 760 nm. Para realizar cuantificación de dichos compuestos, se realizaron curvas de calibración empleando soluciones estándar de ácido gálico con concentraciones de entre 5-50 mg L^{-1}, y como blanco de reacción se utilizó agua desionizada. Los resultados obtenidos para la cuantificación de compuestos fenólicos se muestran en la figura 6, donde se observa que solo *C. krusei* y *T. harzianum* parecen tener un efecto sobre este parámetro, siendo nuevamente el segundo microorganismo el que presenta el mayor cambio, mientras que C. krusei parece mantenerse estable después del día 10. Por otro lado, el control y el tratamiento con *P. manshurica* parecen mantenerse estables durante todo el experimento.

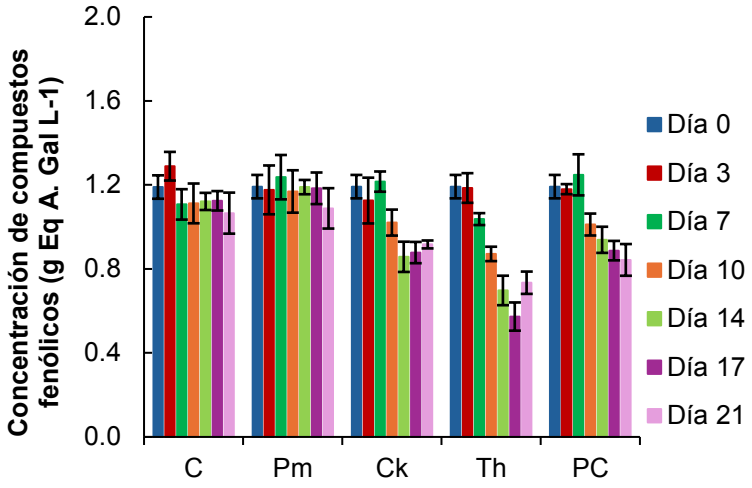


Figura 6. Concentración de compuestos fenólicos a lo largo del tiempo de incubación de microorganismos en vinaza de Tequila. Tratamientos C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

Al comparar estos resultados, con los presentados en la figura 3, se esperaría que, si el pico de absorbancia a 280 nm fuera consecuencia únicamente de compuestos fenólicos, todos los microorganismos presentarían de igual forma una disminución en la concentración de estos, además de que esta se daría en los primeros días del experimento, sin embargo, esto no se observa. Dicho lo anterior, es posible suponer nuevamente la presencia de compuestos como el furfural, 5-metilfurfural y 2-acetilfurano, cuya presencia en vinaza y absorción en esa región del espectro han sido previamente reportados. Por último, de confirmase la presencia de estos compuestos en la muestra en estudios posteriores, indicaría la capacidad de *C. krusei y T. harzianum* para eliminarlos, lo cual, considerando la toxicidad de dichos compuestos presenta una ventaja para el uso de estos microorganismos en el posterior desarrollo de un tratamiento biológico.

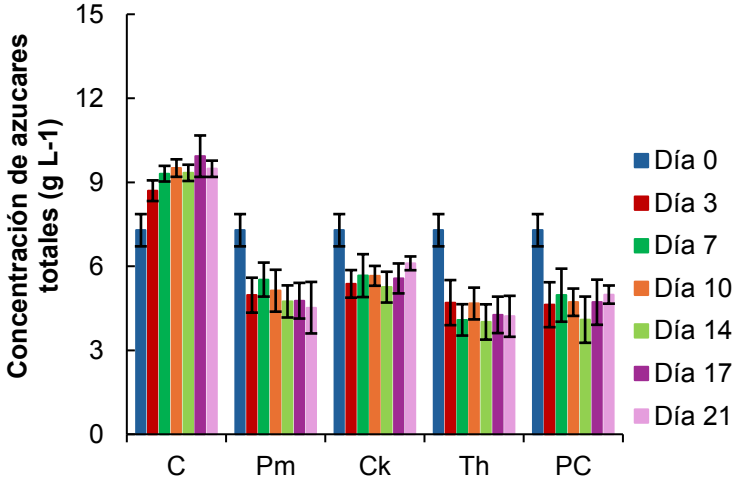


Figura 5. Concentración de azucares totales a lo largo del tiempo de incubación de microorganismos en vinaza de Tequila. Tratamientos C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

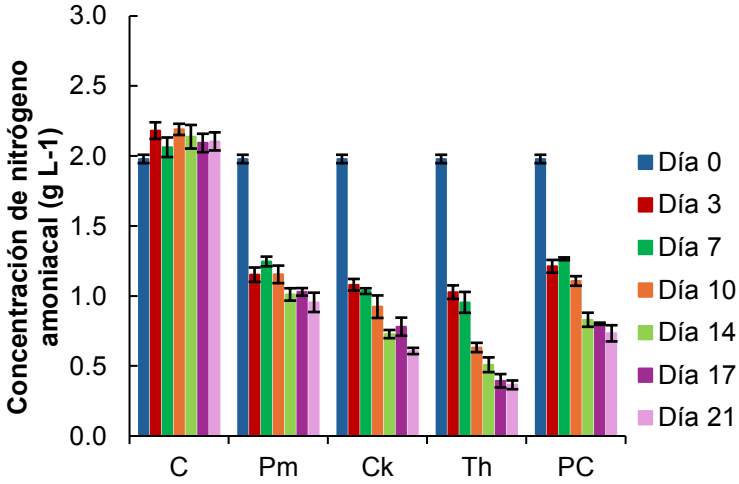


Figura 8. Concentración de nitrógeno amoniacal a lo largo del tiempo de incubación de microorganismos en vinaza de Tequila. Tratamientos C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

Los resultados presentados en la figura 7 nos dan una idea el metabolismo de los microorganismos utilizados, en el caso de la disminución de la concentración de azucares totales, los tres

microorganismos utilizados logran un equilibrio tan solo al día 3 del experimento alcanzando niveles de concentración similares en todos los casos. Por otro lado, el tratamiento control presenta un incremento en los azucares totales en los primeros días del experimento llegando a estabilizarse alrededor del día 7. Dado a que fue demostrado mediante el cultivo en placa de una alícuota de vinaza proveniente de los matraces del tratamiento control, que no existió ninguna contaminación a lo largo del experimento, y que previamente durante el análisis por espectrometría de masas habíamos detectado la presencia de compuestos con enlaces glicosídicos, aunado que fue realizada la repetición de la determinación utilizando al menos dos muestras no sometidas al proceso de incubación agitación y no se observó diferencia entre ellas. Se permite suponer que este aumento de concentración es consecuencia de las condiciones del experimento, considerando el calentamiento el tiempo y las condiciones acidas de la vinaza, la cual había sido previamente esterilizada llevándola a 120 °C durante 15 min en autoclave, lo cual pudo promover la hidrólisis de dichos enlaces.

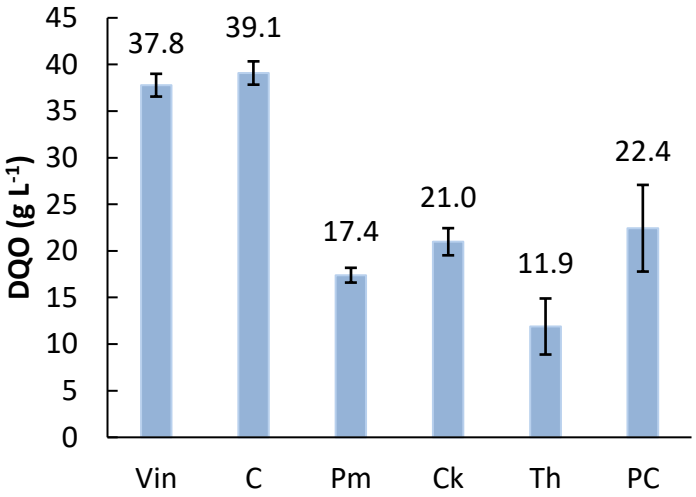


Figura 6. Disminución de DQO después de 21 días de cultivo. C. Control; Pm: *P. manshurica*; Ck: *C. krusei*; Th: *T. harzianum*; PC: *P. manshurica y C. krusei*

Por último, se encontró que los tres microorganismos empleados tienen la capacidad para disminuir el valor de DQO en muestras de vinaza concentradas incluso por encima del 40 % (considerando e valor obtenido en el día 0). Esto es de suma importancia debido a que el DQO es uno de los principales parámetros evaluados para determinar la calidad del agua, así como la efectividad del tratamiento sobre efluentes contaminados provenientes de diversas industrias, como lo es la industria tequilera. De entre los microorganismos evaluados nuevamente T. harzianum presenta los mejores resultados en comparación con P. manshurica y C. krusei, logrando una disminución aproximada del 70 %, contra el 54 % y 42 % respectivamente. Si bien, eficacias incluso superiores en la disminución del DQO para efluentes similares (vinaza de caña de azúcar), utilizando T. harzianum y otras especies del género, esos resultados han sido obtenidos en su mayoría con vinazas previamente diluidas. Tomando en cuenta esto, así como los resultados previamente discutidos, y sumando el existente interés de la industria agroindustrial por T. harzianum, este microorganismo se perfila como una interesante opción para el desarrollo de metodologías para el tratamiento biológico de VT.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la vinaza de tequila (VT) analizada presenta una alta carga contaminante, con valores de DQO total, sólidos suspendidos y pH que exceden los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021, lo que confirma la necesidad de un tratamiento previo antes de su disposición. La caracterización fisicoquímica evidenció un predominio de materia orgánica, lo que evidencia su potencial como sustrato en procesos

biotecnológicos. Entre los microorganismos evaluados, *T. harzianum* demostró ser el más eficiente, al lograr una reducción del DQO cercana al 70 %, una significativa disminución de compuestos fenólicos y un aumento del pH hasta valores por encima de la neutralidad, resultados que superaron a los obtenidos con *C. krusei* y *P. manshurica*. Finalmente, se establece que *T. harzianum* representa una alternativa prometedora para el desarrollo de tecnologías sostenibles enfocadas en el tratamiento biológico de VT concentrada, sin necesidad de dilución previa, lo cual es especialmente relevante para aplicaciones a escala industrial.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. Díaz Barajas, I. Moreno Andrade, y M. Garzón Zúñiga, “Tratamiento de vinazas de mezcal: revisión de procesos evaluados”, Tecnol. Cienc. Agua, 2024, pp. 164–206.
2. A. López López, G. Vazquez, E. Davila Becerril, E. León García, y J. Villegas Valdez, “Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes”, Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 2010, pp. 109–116.
3. H. Ferral Pérez, L. G. Torres Bustillos, H. R. Méndez, y I. Chairez, “Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation”, Ozone Sci. Eng., 2016, pp. 279–290.
4. D. Díaz Vázquez, D. A. Orozco Nunnelly, C. Yebra Montes, C. Senés Guerrero, y M. S. Gradilla Hernández, “Using yeast cultures to valorize tequila vinasse waste: An example of a circular bioeconomy approach in the agro-industrial sector”, Biomass Bioenergy, 2022, art. 106471.
5. G. Zurita, A. Tejeda, R. Montoya, A. Carrillo, R. Sulbarán-Rangel, y C. Álvarez, “Generation of tequila vinasses, characterization, current disposal practices and study cases of disposal methods”, Water, vol. 14, no. 9, 2022, art. 1395.
6. G. Guerrero y A. Vidal, “Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza del Agave angustifolia Haw generada como residuo en la elaboración del mezcal”, CIIDIR Oaxaca, IPN, 2014.
7. R. Pruneda y J. Luis, “Biorremediación de vinazas de la industria tequilera y mezcalera mediante tratamiento fisicoquímico y biológico”, Disponible en: http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1089, 2014.
8. V. Robles González, H. M. Poggi Varaldo, J. Galíndez Mayer, y N. Ruiz Ordaz, “Combined Treatment of Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge”, Water Environ. Res., 2018, pp. 1985–1996.
9. A. Tejeda, R. Montoya, S. Rangel, y G. Zurita, “Possible Pollution of Surface Water Bodies with Tequila Vinasses”, Water, vol. 15, no. 21, 2023, art. 3773.
10. O. García Depraect, R. Muñoz, J. B. van-Lier, E. R. Rene, V. F. Diaz Cruces, y E. León Becerril, “Three-stage process for tequila vinasse valorization through sequential lactate, biohydrogen and methane production”, Bioresour. Technol., 2020, art. 123160.
11. L. M. Martínez Castillo, M. G. Bustos Vázquez, D. Trujillo Ramírez, G. R. Castillejos, y C. R. O., “Caracterización de vinazas de la industria tequilera para su uso como medios nutritivos económicos en fermentaciones con bacterias lácticas”, Investig. Desarro. Cienc. Tecnol. Alim., 2023, pp. 795–801.
12. M. M. Aguilar, L. F. Ferreira, y R. T. Monteiro, “Use of vinasse and sugarcane bagasse for the production of enzymes by lignocellulolytic fungi”, Braz. Arch. Biol. Technol., 2010, pp. 1245–1254.
13. G. E. Barcia, R. A. Cervantes, I. T. Zuñiga, y S. Van Den Hende, “Converting tequila vinasse diluted with tequila process water into microalgae-yeast flocs and dischargeable effluent”, Bioresour. Technol., 2020, art. 122644.
14. S. K. IJayasekara, T. G. Madusanka, C. P. Rupasinghe, H. A. Weerasinghe, C. L. Abayasekara, S. Seneweera, y R. R. Ratnayake, “Bagasse and vinasse, factory wastes from sugarcane industry as potential substrates for bioethanol production”, J. Natl. Sci. Found. Sri Lanka, vol. 49, no. 2, 2021.

15. M. A. Torres, A. L. Valdez, M. V. Angelicola, E. E. Raimondo, H. F. Pajot, y C. G. Nieto-Peñalver, “Vinasse as a substrate for inoculant culture and soil fertigation: Advancing the circular and green economy”, Sci. Total Environ., 2023, art. 164014.
16. U. Contreras Loera, O. Barbosa García, G. Ramos Ortíz, J. L. Pichardo Molina, M. A. Meneses Nava, & J. L. Maldonado, “Identificación y discriminación de tequilas reposados in situ para la protección de marca”, *Nova Scientia*, 2009, pp. 22–32.

USO DE MATERIALES SUSTENTABLES Y DE BAJO COSTO PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA

Arely Mariana Gamez Morales [1], Ernesto Campos Bustos [2], Evenly Cristel Bernal Silva [2], Saraí Janeth Aguilar Martínez [2], Araceli Jacobo Azuara *[1], Paloma Eloísa Ramírez Zuñiga *[1]

[1]Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Col. Noria Alta S/N, C.P. 36050, Guanajuato, Gto., México. [2]Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Farmacia, Col. Noria Alta S/N, C.P. 36050, Guanajuato, Gto., México.
*aazuara@ugto.mx[1]

RESUMEN

Actualmente se desarrollan metodologías sustentables y de bajo costo para la remoción de contaminantes tóxicos en agua. La presencia de metales pesados como Cromo (IV) y colorantes textiles representa un problema ambiental y de salud derivados de actividades como la agricultura y la industria. Ante esto, hoy se han promovido técnicas de adsorción debido a su fácil manejo, alta selectividad y diversidad de adsorbentes. La adsorción es un fenómeno superficial donde las sustancias se acumulan en una superficie o interfase. El compuesto adsorbido se denomina adsorbato y el material donde ocurre la adsorción es el adsorbente. Entre los adsorbentes más utilizados están el carbón activado, arcillas y otros minerales. Este estudio explora el uso de ceniza volcánica que es un material accesible que forma un adsorbente eficiente y económico.

La síntesis de compositos adsorbentes a partir de carbón activado con ceniza volcánica ofrece un enfoque innovador para la purificación del agua. En la metodología, el carbón activado se combina con ceniza volcánica para mejorar la adsorción, dicha ceniza volcánica se obtuvo de la erupción del volcán Popocatépetl en el mes de mayo del 2023. El proceso comienza con la preparación de los materiales: el carbón activado proviene de biomasa mediante activación térmica o química, mientras que la ceniza volcánica se muele hasta obtener un tamaño de partícula óptimo. Luego, ambos se mezclan en solución alcalina y se someten a tratamiento térmico en atmósfera inerte a temperaturas de 500-800 °C, generando una estructura porosa con gran superficie específica, ideal para la absorción de colorantes y fármacos.
Los datos de equilibrio y cinética de adsorción se obtuvieron en una columna de adsorción, respectivamente. Los experimentos se realizaron a pH =5 y T = 25 °C y se usaron concentraciones entre 20 y 200 ppm de cada uno de los contaminantes.

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas más importantes en estos tiempos es la contaminación de cuerpos de agua debido a la amenaza que esta genera a la salud humana y el medio ambiente. La importancia de generar técnicas nuevas con diversos adsorbentes para la remoción de contaminantes inicia en la complejidad de síntesis de adsorbentes convencionales, buscando desarrollar nuevos con características sustentables y de bajo costo. La adsorción se define como un fenómeno superficial que involucra la acumulación o concentración de sustancias en una superficie o interfase. El compuesto adsorbido se llama adsorbato y la fase o material donde ocurre este fenómeno se conoce como adsorbente [1].

La presencia de metales pesados, colorantes textiles, así como de Flúor y Cromo VI son comunes en aguas residuales causando eutroficación, problemas ambientales y de salud. Es por ello la importancia del desarrollo de técnicas que mitiguen dicha contaminación, y aunque la adsorción no es un proceso nuevo en el tema, gana ventajas sobre otras técnicas debido a su fácil manejo, alta selectividad y gran variedad de adsorbentes. Sin embargo, los adsorbentes convencionales resultan ser costosos por la complejidad de la síntesis y las altas temperaturas de activación, ocasionando un gran consumo de energía, originando que en los últimos años se estén desarrollando nuevos adsorbentes con características sustentables y de bajo costo, entre este tipo de materiales se encuentran los compositos a base de fuentes de sílice como la ceniza volcánica, que aunque ya han

sido estudiados como materiales adsorbentes de distintos contaminantes como metales pesados y colorantes azoicos, sus propiedades fisicoquímicas como su capacidad de intercambio catiónico, porosidad, estabilidad térmica y mecánica favorecen la capacidad de adsorción con respecto a los adsorbentes convencionales.

TEORÍA

Los compositos de ceniza volcánica son obtenidos a partir de la mezcla en óptimas proporciones de un mineral de aluminosilicatos, tales como arcillas naturales, calcinadas o diferentes subproductos industriales (precursor) y una solución altamente alcalina denominada activador, la cual da origen a un material de características cementantes. Como principal producto se obtiene un gel de aluminosilicato (N-A-S-H), y en algunos casos se generan fases zeolíticas con ordenamiento de corto alcance como producto secundario. La mezcla entre el precursor y el activador genera una serie de reacciones (geopolimerización) que se desarrollan a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, y el producto obtenido presenta propiedades comparables e incluso superiores a materiales cerámicos tradicionales.

La estructura del composito es principalmente una estructura tipo gel aluminosilicato, conformados por tetraedros de Si^{4+} con sustitución parcial por Al^{3+} donde el balance de carga se logra con la presencia de los cationes alcalinos, Na^{+} o K^{+}. En general, se emplean como activantes silicatos de sodio o potasio mezclados con hidróxidos de metales alcalinos. No obstante, se sugieren otras fuentes de sílice alternativas de menor impacto ambiental como la ceniza de cascarilla de arroz, humo de sílice o ceniza volcánica.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de compositos de ceniza volcánica

La síntesis de los compositos espumados por microondas se muestra en la Figura 1 donde primero se llevó a cabo la activación alcalina de la sílice de la ceniza volcánica en una solución de NaOH con una relación molar de Na_2O/SiO_2 = 0.3 en agua desionizada, la mezcla se homogeneizó completamente con agitación magnética y después se llevó a cabo la adición del metacaolín en relación SiO_2/Al_2O_3 = 6. Se homogeneizó con agitación magnética con una relación molar de agua de H_2O/Na_2O = 14. Después se llevó el paso de espumado y fraguado con ayuda de un horno de microondas convencional y con un molde de silicón de 1x1 cm, se adicionó aproximadamente 2 mL de gel anteriormente homogeneizado y se llevó a el horno calentando aproximadamente 1 min y con ayuda de unos guantes de protección para altas temperaturas se retiró con cuidado del molde y se dejó unos momentos enfriar por completo (ver Figura 2). Después se lavó para retirar el exceso de material sin reaccionar y de NaOH hasta pH = 7 y al finalmente se secó para tener el material listo para su aplicación.

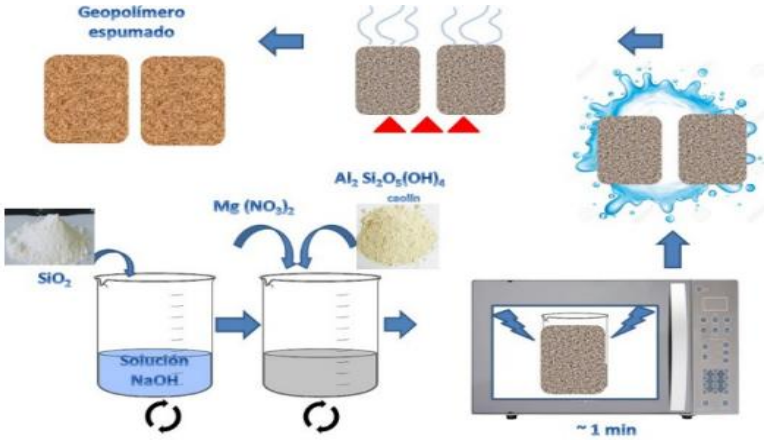


Figura 1. Síntesis del composito de ceniza volcánica

Figura 2. Compositos de ceniza volcánica

Cinética de adsorción

Los datos experimentales de la cinética de adsorción se obtuvieron utilizando una columna de vidrio empacada con el composito (ver Figura 4). Se utilizaron 15 g del composito de ceniza volcánica para empacar la columna y se le hizo pasar 1000 mL de una solución de 20 ppm del contaminante en flujo ascendente a una velocidad de 5 mL/min, se tomaron alícuotas de 5 mL cada minuto los primeros 5 minutos y posteriormente cada 5 minutos hasta llegar a los 60 minutos para continuar tomando muestra cada 30 minutos, hasta alcanzar el equilibrio de adsorción, en el caso de los colorantes el experimento se detuvo hasta que disminuyó la coloración.

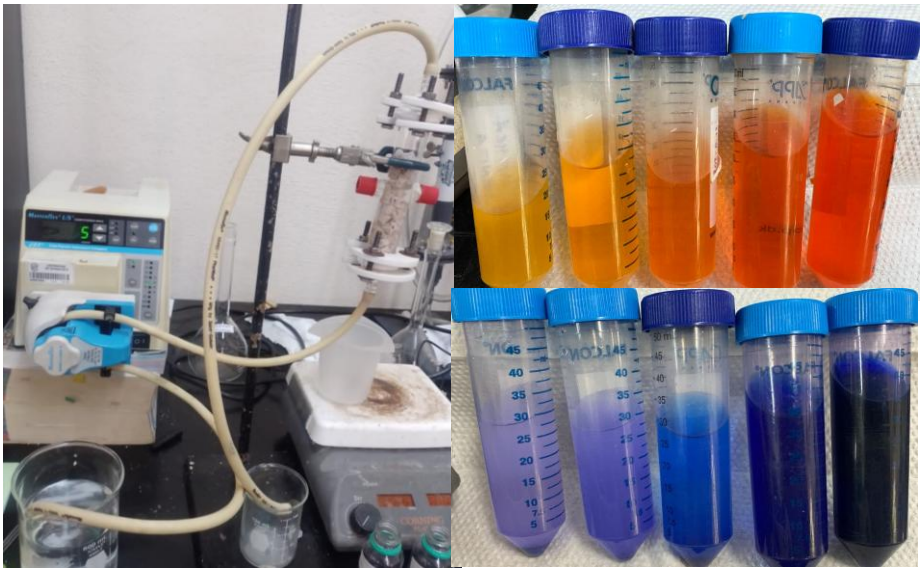


Figura 3. Proceso del experimento de adsorción en columna y remoción de los colorantes naranja de metilo y azul de metileno

RESULTADOS

Los resultados de Infrarrojo se muestran en la Figura 5. Se observa que las bandas que aparecen a los 3400 cm-1 y a los 1630 cm-1en todos los materiales después del lavado y del proceso de adsorción hacen referencia a las vibraciones de estiramiento y flexión de los enlaces H-O-H. La

banda que aparece entre los 2900 y 2800 cm-1 en los compositos después del lavado es asociada a las vibraciones de los enlaces C-H, el hecho de que aparezca puede ser atribuido a la utilización del ácido acético cuyo espectro presenta esta misma banda.

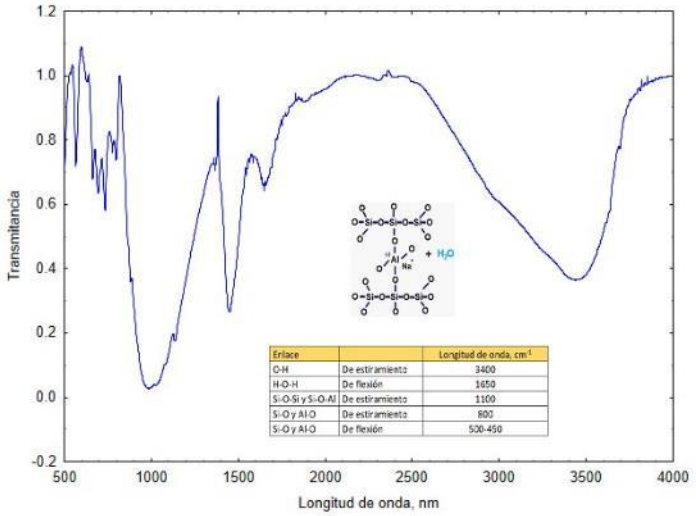


Figura 4. Espectro de infrarrojo para el composito de ceniza volcánica

Adsorción de contaminantes en los compositos de ceniza volcánica

Los resultados experimentales de equilibrio de adsorción para los metales catiónicos (Plomo, Cadmio y Cobre), los aniones Flúor y Cromo VI, así como de los colorantes azul de metileno y naranja de metilo se muestran en las Figuras 6,7 y 8, respectivamente. Los datos experimentales se obtuvieron a condiciones constantes de pH = 5 y T = 25 °C en un tiempo de equilibrio de 5 días. Se observa que para los metales la máxima capacidad de adsorción fue de 8 mg/g para la adsorción de Cobre y la mínima de 4 mg/g para el Plomo y Cadmio (ver Figura 6) a una concentración en equilibrio de 150 mg/L aproximadamente. La afinidad del composito por los metales tuvo el siguiente comportamiento Cu > Pb > Cd, es probable que el tamaño del radio iónico de cada uno de los metales, así como la electronegatividad influyan en la movilidad y atracción de los iones metálicos en solución sobre los sitios activos del composito. La isoterma de adsorción de los aniones de Flúor y Cromo VI se muestran en la Figura 7, se observa una mayor capacidad de adsorción para el Flúor de 2.7 veces con respecto al ion cromato para una concentración en equilibrio de 40 mg/g, esto puede ser debido al tamaño del ion. En el caso de la adsorción de los colorantes azul de metileno y naranja de metilo (ver Figura 8), se observa que a concentraciones en equilibrio menores de 5 mg/L, la capacidad de adsorción del composito es similar para los dos compuestos, pero al aumentar la concentración se ve incrementada la capacidad de adsorción del naranja de metilo hasta 2 veces más que la del azul de metileno. En este caso, la adsorción puede deberse a la afinidad química entre las moléculas orgánicas que ya se adsorbieron dentro de los mesoporos del composito de ceniza volcánica. Los resultados experimentales del equilibrio de adsorción se interpretaron con el modelo de la isoterma de Langmuir y en función de la constante de Langmuir (KL) que se refiere a la afinidad de adsorción entre el composito y el adsorbato, en este caso de cada uno de los contaminantes usados en este trabajo. En la Tabla 1, se muestra la relación del parámetro RL con respecto al tipo de isoterma. En todos los casos el valor de este parámetro está en un intervalo de 0.03-0.7, por lo que se considera una isoterma de adsorción favorable a las condiciones de pH = 5 y T = 25 °C.

Tabla 1. Parámetro de Langmuir (R_L)

$R_L>1$	Isoterma no favorable
$R_L=1$	Isoterma lineal
$0<R_L<1$	Isoterma favorable
$R_L=0$	Isoterma irreversible

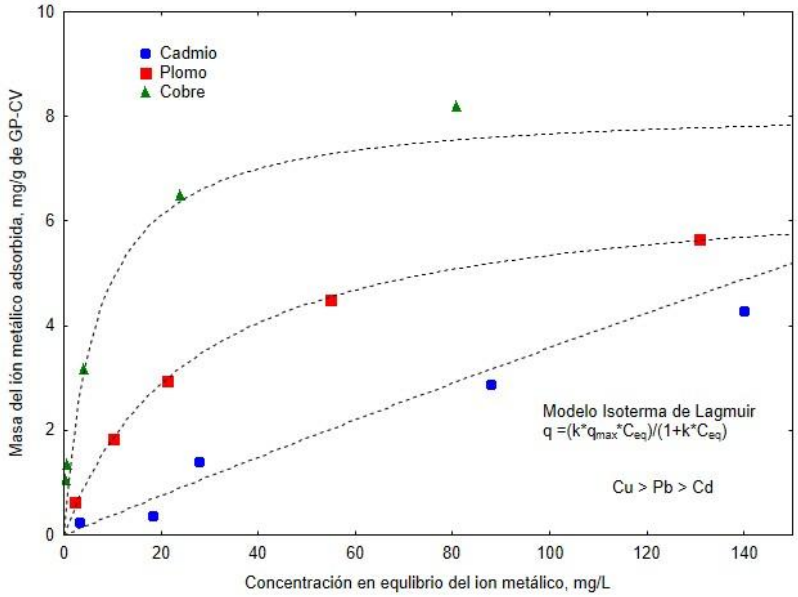


Figura 5. Isoterma de adsorción de plomo, cobre y cadmio sobre un composito de ceniza volcánica a pH=5 y T=25°C

Porcentaje de remoción y tipo de isoterma de adsorción

El porcentaje de remoción de cada uno de los compuestos se obtuvo mediante el uso de una columna empacada con los compositos, utilizando una velocidad de flujo ascendente de 5 mL/min y con una concentración inicial de 20 mg/L. En la Figura 9 se muestran los porcentajes obtenidos para cada compuesto y se observa que el porcentaje de remoción fue mayor para los colorantes, seguido del flúor y el cadmio, el cromo VI fue el que presentó un menor porcentaje de remoción.

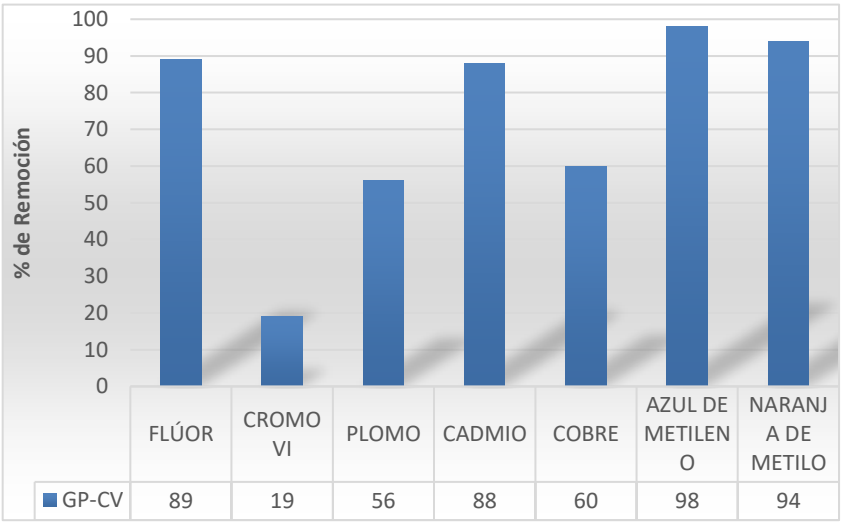


Figura 6. Porcentaje de remoción para la adsorción de compuestos tóxicos en agua sobre compositos de ceniza volcánica

CONCLUSIONES

Se obtuvo una metodología confiable y reproducible para la síntesis de un composito a base de ceniza volcánica mediante una reacción de geopolimerización en medio alcalino, el cual puede ser utilizado como adsorbente debido a la presencia de grupos funcionales como Fe-OH, Si-OH, Al-OH que favorecen que el composito tenga una carga residual positiva.

La adsorción de compuestos tóxicos como Plomo, Cadmio y Cobre es favorable a pH = 5 y T =25 °C, debido a las atracciones electrostáticas tipo Van der Waals originadas por la carga negativa de la superficie del composito y la carga positiva de los cationes metálicos al pH de trabajo. En el caso de los iones de Flúor y Cromo VI, ocurre el mismo mecanismo de adsorción, pero por la presencia de sitios activos positivos debido al Fe de la ceniza volcánica.

Los datos de equilibrio de adsorción se interpretaron satisfactoriamente por el modelo de la isoterma de Lagmuir, con una correlación R2 = 0.97

BIBLIOGRAFÍA

1. Leyva-Ramos, R. Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase liquida: solidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones [libro]. - Bogotá, Colombia: ediciones uniandes, 2007.
2. Shi, Q., Li, A., Zhou, Q., Shuang, C., Li, Y., & Ma, Y. (2014). Utilization of waste cation exchange resin to prepare carbon/iron composites for the adsorption of contaminants in water. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.029
3. Sidjou, A. S., Tchakounte, A. N., Shikuku, V., Lenou, I., Djimtibaye, R., & Dika, M. M. (2023). Synthesis of alkali-activated volcanic scoria and rice husk ash based composite materials for adsorptive removal of crystal violet: Optimization, kinetics, isotherms and mechanism. Hybrid Advances, 4, 100113. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100113
4. Albadarina Ahmad B, Chirangano Mangwandia Ala'a H. Al-Muhtaseb, Walkera Gavin M. y Allena Stephen J. Ahmada Mohammad N.M. Kinetic and thermodynamics of chromium ions adsorption onto low-cost dolomite adsorbent [Publicación periódica], Chemical Engineering Journal. 2012.- Vol. 179.- págs. 193–202.
5. N. Ranjbar, M. Mehrali, M. Mehrali, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, "Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites," Cem Concr Res, vol. 76, pp. 222–231, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.06.003.

CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE CHILE (*Capsicum Annuum* L.)

María de la Luz Buendía-Valverde[1], Fernando C. Gómez Merino[2], Libia I. Trejo-Téllez[3], María Guadalupe Peralta-Sánchez[4]

[1-4]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
buendia.luz@colpos.mx

RESUMEN

La contaminación por metales de transición en los suelos agrícolas se produce por fuentes naturales y antropogénicas. En plantas, el Cd puede provocar deficiencias nutrimentales, estrés oxidativo y alteración de enzimas. Además, las plantas que contienen Cd pueden ser destinadas a la alimentación de animales, incluido el humano, lo cual representa un riesgo a la salud. Por lo anterior, se estudió el efecto de la exposición a Cd (0, 5 y 10 µM $CdCl_2$) en la concentración foliar de este elemento en plantas de tres variedades de chile (Jalapeño, Poblano y Serrano). Los tratamientos fueron añadidos a la solución nutritiva de Steiner 80 d, transcurrido el periodo de tratamiento, las plantas se cosecharon, las hojas fueron secadas, molidas y llevadas a digestión ácida con HNO_3:$HClO_4$, en el extracto resultante se determinó la concentración de Cd por medio del espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado (ICP-OES 725-ES). Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$). Los tratamientos con 5 y 10 µM $CdCl_2$ generaron concentraciones foliares de Cd de 16.23 y 27.63 mg kg^{-1} en chile Jalapeño; de 23.09 y 38.32 mg kg^{-1} en Poblano; y de 11.97 y 24.08 mg kg^{-1} en Serrano, respectivamente. Se concluye que las plantas de chile acumulan fácilmente Cd en sus hojas, siguiendo el gradiente de concentración: Poblano > Jalapeño > Serrano.

INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un metal de transición que se encuentra ubicado en el grupo 12 de la tabla periódica de los elementos, su nombre proviene de la palabra latina "*cadmia*" que significa "calamina", mineral que fue la primera fuente de Cd después de su descubrimiento en 1817. Posee una densidad relativa de 8.64 g cm^{-3}, por lo que es clasificado como metal pesado (EPA, 1999; Genchi *et al*., 2020).

Como todo metal, puede combinarse con otros elementos para formar diversos compuestos como cloruros, óxidos y sulfuros, los cuales son utilizados en distintos procesos industriales como chapado de materiales (protector de la corrosión), fabricación de baterías (Ni-Cd), en pigmentos (pinturas y plásticos), en la fabricación de semiconductores y celdas solares, en aleación con otros metales como el cobre (Cu), plata (Ag) y zinc (Zn) para aumentar la dureza, entre otros (IPCS, 1992; Bibi *et al.*, 2023).

En la atmósfera, el Cd es removido a través de deposición de partículas, precipitación y escorrentía; sin embargo, los desechos líquidos industriales son la principal fuente de contaminación de suelos y cuerpos de agua (Pernía *et al*., 2008).

Debido al incremento de la actividad industrial y a los métodos intensivos de cultivo, principalmente el uso excesivo de fertilizantes fosfatados, los suelos agrícolas están experimentando cambios en la composición de sus minerales, permitiendo concentraciones de Cd superiores a lo habitualmente encontrado en sitios no perturbados (0.01 a 1mg kg^{-1}) (UNEP, 2010; Kubier *et al*., 2019).

Los efectos del Cd en la mayoría de las especies de plantas resultan ser negativos, la inhibición del crecimiento es el síntoma distintivo de su toxicidad, aunque también provoca disminución de la biomasa, reducción en el crecimiento de la raíz, clorosis, alteraciones en la fotosíntesis y en la concentración de nutrientes (Huang *et al.*, 2017).

Cereales como el arroz pueden acumular altas concentraciones de Cd, pero también, granos como la soya, semillas como el cacao, tubérculos como la papa y la remolacha, y hortalizas de hoja verde como la lechuga, la espinaca y la acelga (Wang *et al.*, 2023).

Este trabajo evaluó la concentración de Cd en hojas de tres variedades de chile, desde la perspectiva del riesgo que representa consumir hortalizas que absorben eficientemente Cd.

PARTE EXPERIMENTAL

Germinación de semillas y obtención de material vegetal

Se germinaron semillas híbridas de chile (*Capsicum annuum* L.) de Jalapeño, Poblano y Serrano en charolas de unicel de 200 cavidades con turba como sustrato, aplicando riegos ligeros cada tercer día hasta obtener plántulas de entre 15 y 20 cm de longitud.

Trasplante, diseño experimental y tratamientos

El trasplante se realizó en bolsas de plástico usando tezontle rojo como sustrato, se colocó un sistema de riego por goteo con solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984), con valor de conductividad eléctrica de 2 dS m^{-1} y el pH se ajustó a 5.5.

Las plantas fueron distribuidas completamente al azar con seis repeticiones cada tratamiento dentro de un invernadero tipo túnel y aclimatadas por 20 d, al terminar este periodo se aplicaron los tratamientos descritos en el Cuadro 1. La fuente de Cd fue $CdCl_2$ (Sigma Aldrich).

Cuadro 1. Tratamientos de Cd en chile Jalapeño, Poblano y Serrano expuestos por 80 d.

Variedad	Concentración de Cd (µM)		
Jalapeño			
Poblano	0	5	10
Serrano			

Preparación de las muestras vegetales

Después de 80 d de tratamiento, las plantas se recolectaron y llevaron al laboratorio donde se lavaron con agua destilada, se extrajeron las hojas, las cuales fueron secadas en una estufa de aire forzado (Riossa modelo HCF-125D; Monterrey, N. L., México) y molidas a tamaño partícula.

La concentración de Cd se realizó por medio de una digestión ácida con HNO_3:$HClO_4$ (2:1, v:v) siguiendo la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999), usando un equipo de espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Análisis de datos

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias con la prueba Tukey ($P \leq 0.05$), usando el software SAS (SAS, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el análisis químico foliar después de 80 d de tratamiento, se encontraron diferencias en la concentración de Cd entre variedades de chile. Además, la concentración de Cd ofertada se relacionó de manera directa con la concentración foliar de Cd en las tres variedades, en el gradiente de concentración Poblano > Jalapeño > Serrano (Figura 1).

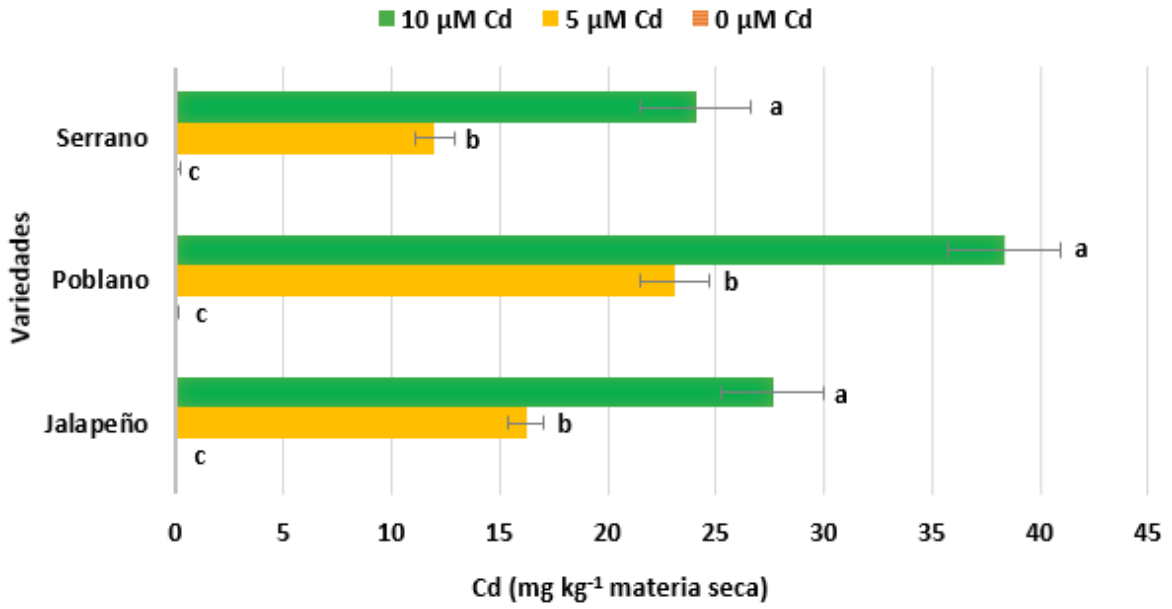


Figura 1. Concentración foliar de Cd en plantas de chile, en las variedades Jalapeño, Poblano y Serrano. Medias ± DE con letras en cada variedad distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

El Cd ingresa a la dieta humana a través de vegetales cultivados en suelos contaminados, esto representa un riesgo para la salud debido a que el Cd se acumula en el cuerpo, no se elimina fácilmente porque su tiempo de vida media es de 10 a 30 años, un individuo puede acumular Cd en órganos vitales como el riñón y el hígado (Kubier *et al.*, 2019).

A lo largo de la historia se han reportado casos de intoxicación crónica de Cd, el caso más conocido ocurrió de Japón en la década de los 50, donde por la contaminación de Cd en cultivos de arroz ocasionó que las personas experimentaran lesiones renales, anemia, lesión ósea a causa de osteomalacia y osteoporosis. Los efluentes de una mina de zinc llegaron al río Jinzu donde estas aguas regaban arroz y otros productos (Nordberg *et al.*, 2018).

En nuestro trabajo encontramos que la acumulación de Cd por las plantas de chile es muy eficiente, lo que sugiere que la especie *Capsicum* es altamente sensible a este metal. Es necesario el análisis de suelos agrícolas y el monitoreo que cultivos para garantizar productos saludables libres de metales no esenciales como el Cd (Nordberg *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

El Cd es altamente absorbido por las plantas de chile, provocando altas concentraciones de este elemento en hojas, en el gradiente de concentración entre variedades: Poblano > Jalapeño > Serrano. La variedad Poblano registró los mayores valores de concentración al ser tratado con 10 y 20 µM Cd (23.09 y 38.32 mg Cd kg^{-1} de materia seca).

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Steiner, “The universal nutrient solution”. In: *6th International Congress on Soilless Culture*, (Wageningen, The Netherlands,1984) pp. 633-650.
2. A. Kubier, R. T. Wilkin, T. Pichler, “Cadmium in soils and groundwater: A review”, Appl. Geochem., Vol. 108, 2019, 104388.

3. B. Pernía, A. de Sousa, R. Reyes, R. Castrillo, “Biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas”, Interciencia, Vol. 32, 2, 2008, pp. 112-119.
4. D. Huang, X. Gong, Y. Liu, G. Zeng, C. Lai, H. Basshir, L. Zhou, D. Wang, P. Xu, M. Cheng, J. Wan, “Effects of calcium at toxic concentrations of cadmium in plants”, Plants, Vol. 245, 2017, pp. 863-873.
5. EPA, Environmental Protection Agency, “Toxicological review of cadmium and compounds”, (Washington, D. C. 1999), 85 p.
6. G. F. Nordberg, A. Bernard, G. L. Diamond, J. H. Duffus, P. Illing, M. Nordberg, I. A. Bergdahl, T. Jin, S. Skerfving, “Risk assessment of effects of cadmium on human health (IUPAC Technical Report)”, Pure Appl. Chem., Vol. 90, 4, 2018, pp. 755-808.
7. G. Alcántar-González, M. Sandoval-Villa, “Manual de análisis químico de tejido vegetal”, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Publicación especial No. 10. 1999, Chapingo, México.
8. G. Genchi, M. S. Sinicropi, G. Lauria, A. Carocci, A. Catalano, “The effects of cadmium toxicity”, Int. J. Environ. Res. Public Health, Vol. 17, 11, 2020, 3782.
9. IPCS, “Cadmium”. World Health Organization, International Programme on Chemical Safety, (Environmental Health Criteria Geneva,1992), p. 134.
10. M. Bibi, F. B. Samiullah, S. Saba Afzal, “Essential and non-essential heavy metals sources and impacts on human health and plants”, Pure Appl. Biol., Vol. 12, 2, 2023, pp. 835-847.
11. R. Wang, P. Sang, Y. Guo, P. Jin, Y. Cheng, H. Yu, Y. Xie, W. Yao, H. Qian, “Cadmium in food: Source, distribution and removal”, Food Chem., Vol. 405, 2023, 134666.
12. SAS Institute Inc. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA. 2011.
13. UNEP, United Nations Environment Programme. “Final review of scientific information on cadmium”, 2010, 201 p.

CIENCIA Y TRADICIÓN: APERTURA DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGAVES NATIVOS Y SUS DESTILADOS DE LA UANL

Deyani Nocedo-Mena, Eduardo Pérez Tijerina

Centro de Investigaciones en Ciencias Físico Matemáticas, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
deyani.nocedomn@uanl.edu.mx

RESUMEN

La elaboración de destilados de agave es una tradición profundamente enraizada en la cultura mexicana. Su calidad depende de múltiples factores, como la madurez del agave, los métodos de cocción, fermentación, destilación y las condiciones de almacenamiento. A pesar del creciente interés nacional e internacional por estos productos, uno de los principales retos sigue siendo garantizar su calidad y autenticidad ante la competencia global y los estándares regulatorios.

En este contexto, el destilado de agave "*Flammam*", desarrollado por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) con motivo de su 90 aniversario, representa un esfuerzo por conjugar tradición y ciencia. Este producto artesanal se elabora a partir de *Agave gentryi*, *aspérrima* y *americana*, especies que crecen de manera silvestre en el campus de turismo científico de la UANL. "*Flammam*" es el resultado de un proyecto de investigación multidisciplinario con impacto social y productivo, que busca promover el desarrollo económico regional mediante la valorización de especies nativas.

Como parte de esta iniciativa, se identificó la necesidad de establecer un Laboratorio de Control de Calidad especializado en el análisis de agaves nativos y sus destilados. Su misión principal consistió en monitorear analíticamente los procesos involucrados en la obtención del destilado "*Flammam*"; no obstante, sus funciones se han ampliado para brindar apoyo analítico a pequeños y medianos productores de la región.

Para el logro de estos objetivos, el laboratorio cuenta con equipamiento especializado, incluyendo un espectrómetro FT-IR Thermo Scientific Nicolet iS50 y un cromatógrafo de gases Thermo Scientific Trace 1610 con detector de ionización de flama (FID). Con estos instrumentos se implementó un seguimiento analítico en diversas etapas de la producción, desde la materia prima hasta el producto final. Se incorporaron, además, técnicas metabolómicas y análisis estadístico multivariado como herramientas analíticas claves para el desarrollo de las investigaciones. Entre los estudios realizados se incluyen la identificación de grupos funcionales relevantes para las propiedades químicas y sensoriales del destilado, la detección de impurezas, y la caracterización del perfil químico en distintos lotes de producción. Los resultados han demostrado que estas metodologías permiten detectar adulteraciones, optimizar la selección de materia prima, y mejorar los procesos productivos, garantizando el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016.

El establecimiento del laboratorio beneficia a los productores locales al fortalecer sus capacidades técnicas y abrir nuevas oportunidades económicas. Al mismo tiempo, fomenta la investigación científica, la formación de recursos humanos y la colaboración interdisciplinaria. En el futuro, se contempla la incorporación de un espectrofotómetro de absorción atómica para ampliar el análisis hacia la detección de metales pesados. Con esta iniciativa, la UANL reafirma su compromiso con la ciencia y la tradición, reconociendo que las técnicas ancestrales de producción, si bien preservan la identidad cultural, deben complementarse con herramientas científicas que garanticen una calidad constante y competitiva a nivel internacional.

INTRODUCCIÓN

El mezcal es un destilado artesanal emblemático de México. La Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016 la refiere como bebida alcohólica destilada mexicana, 100% maguey o agave, obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados, extraídos de

cabezas maduras de magueyes o agaves cocidos, cosechados en los territorios con Denominación de Origen (DO) [1]. Durante el proceso de producción, la materia prima (Agave) sufre muchas reacciones químicas y bioquímicas que dan lugar a un producto destilado rico en diferentes compuestos. Su calidad es una combinación de diferentes factores como la madurez del Agave, la cocción, la fermentación (levadura), la destilación, etc. Por lo tanto, su composición es muy compleja como al igual que en otros productos destilados [2]. Esta bebida es elaborada principalmente mediante métodos artesanales, aunque también existen procesos industrializados. Su obtención comprende diversas etapas, desde la selección y corte del agave, hasta la rectificación y la maduración del destilado. Cada una de las fases implicadas puede influir significativamente en la calidad química y sensorial del producto final, así como en sus rendimientos. En los últimos años se ha experimentado un crecimiento en su popularidad y en los niveles de exportación del mezcal, sin embargo, uno de los mayores retos para esta bebida es asegurar su autenticidad y mantener una calidad constante frente a la creciente competencia y las exigencias normativas [1].

La elaboración del mezcal presenta variaciones dependiendo de la región, y aunque las técnicas tradicionales contribuyen a preservar su valor cultural, no existe una estandarización en su proceso productivo. Por otro lado, a pesar de que se han realizado investigaciones sobre la composición del agave y los procesos de obtención, aún es necesario profundizar en el estudio de la variabilidad química y metabolómica de los agaves silvestres, especialmente considerando los efectos de las estaciones del año. Además, es importante el análisis de los compuestos minoritarios que aportan características únicas a cada mezcal, vinculadas al tipo de agave, la región de origen y las técnicas locales de procesamiento. Estos componentes pueden ser clave para establecer criterios de autenticidad y diferenciar entre las distintas zonas productoras. Esta diversidad química es una expresión de las particularidades propias que cada territorio imprime en su mezcal. Por ello, resulta esencial la identificación y caracterización de los compuestos que conforman el perfil químico distintivo de cada producto [1], [2], [3].

Por otra parte, es conocido que el mezcal es una bebida especialmente susceptible a la adulteración, pues puede mezclarse con facilidad con otros líquidos de menor calidad. Esta práctica no solo compromete su autenticidad y valor en el mercado, sino que también representa un riesgo para la salud de quienes lo consumen. En este sentido, se han adoptado múltiples estrategias y medidas de control para garantizar la seguridad de los consumidores, considerando que aproximadamente entre el 40 % y el 50 % de las bebidas ingeridas en México son de origen ilegal y clandestino [3], [6].

Ante estos retos relacionados con la calidad, autenticidad y seguridad del mezcal, resulta indispensable contar con espacios que permitan su análisis integral desde una perspectiva científica y técnica. La creación de infraestructura dedicada al estudio y certificación de destilados es una estrategia clave para apoyar al sector mezcalero. En este contexto, la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) impulsa una iniciativa importante: el nuevo laboratorio de análisis de agaves nativos y sus destilados, avanzando hacia la innovación, la sostenibilidad y la vinculación regional para atender estas necesidades. Este nuevo espacio, diseñado para analizar y certificar principalmente el destilado de agave *Flammam* (figura 1), subraya el compromiso de la universidad con el desarrollo científico y productivo [7]. Con tecnología de vanguardia y un equipo de expertos, este laboratorio se posiciona como un pilar clave para productores locales, investigadores y amantes del buen mezcal y otros destilados de agave. Esta iniciativa, a través de un enfoque multidisciplinario social y productivo, busca potenciar el desarrollo del sur del estado desde la universidad.

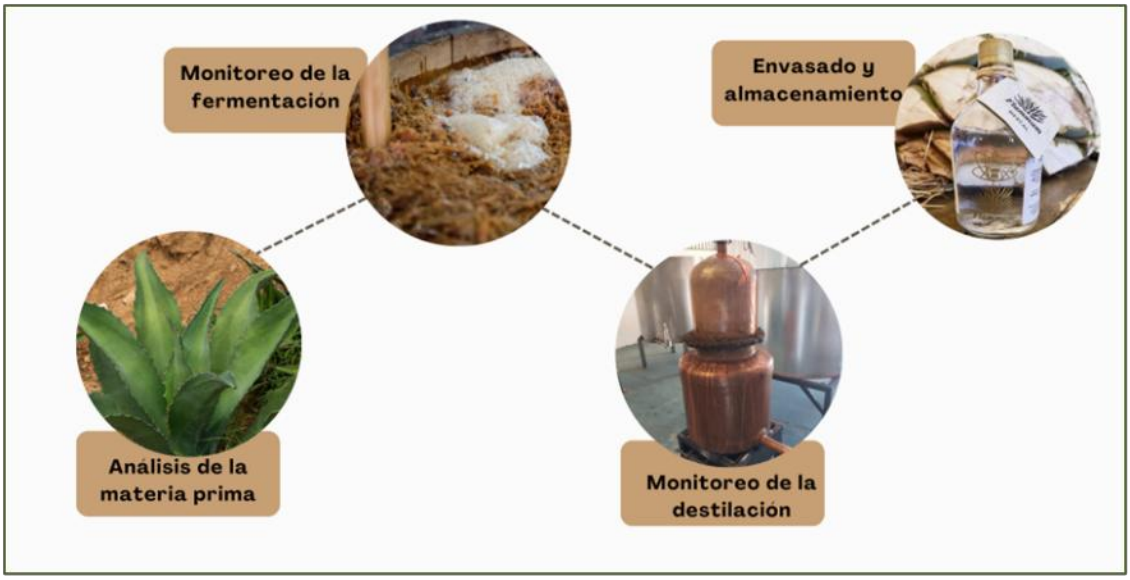


Figura 1. Etapas para el control de la calidad en la cadena productiva de *Flammam.*

El destilado de agave *Flammam* es elaborado artesanalmente a partir de los agaves nativos: *A. gentryi*, *A. aspérrima,* y *A. americana*, que crecen de manera silvestre en el campus de turismo científico de la Universidad Autónoma de Nuevo León dentro del Observatorio Astronómico universitario, ubicado en el municipio de Iturbide, Nuevo León. Las piñas de agave, cultivadas de manera silvestre y sin agroquímicos, se procesan por métodos tradicionales que imprimen una identidad única al producto final. *Flammam* es un destilado de agave tipo joven, incoloro con un suave tinte platinado y con aroma ahumado de leña de la región de San Carlos, Tamaulipas, es un destilado de agave blanco artesanal. Este producto representa un esfuerzo multidisciplinario, social y productivo, orientado a rescatar la tradición ancestral del estado en la producción del destilado de agave. Además, busca generar un impacto social y económico en la región mediante acciones van desde obtener la DO, la implementación de una fábrica artesanal experimental, programas de reforestación, capacitación y la transferencia del proyecto a las comunidades (Figuras 2 y 3) [7]. Sin embargo, enfrenta retos relacionados con la estandarización de los procesos, y mejora de la eficiencia productiva, pudiendo comprometer su competitividad y expansión del mercado.

Figura 2. Proyecto de desarrollo del destilado de agave *Flammam.*

Figura 3. Fábrica artesanal experimental del destilado de agave *Flammam.*

Entre los objetivos del laboratorio se encuentra asegurar la calidad del destilado de agave *Flammam* mediante el monitoreo analítico de su proceso productivo (figura 1), en cumplimiento con la NOM-070-SCFI-2016. Además, busca ofrecer apoyo técnico a pequeños productores de la región y promover la investigación científica relacionada con los destilados de agave. Para alcanzar estos objetivos, el laboratorio cuenta con tecnología de vanguardia que permite realizar diversos análisis químicos esenciales para la certificación de diferentes productos.

PARTE EXPERIMENTAL

El equipamiento de la primera etapa incluye un espectrómetro FT-IR Thermo Scientific Nicolet iS50 y un cromatógrafo de gases Thermo Scientific Trace 1610 con detector de ionización de flama (FID), ambos adquiridos a través de Instrumentación y Servicios Analíticos S.A., México.
Estudios previos ha reportado la espectroscopía FT-MIR y FT-NIR junto con análisis multivariado para cuantificar adulterantes (agua, etanol, metanol) en tres clases de mezcal (blanco, reposado, añejo), así como cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) [8]. Al igual que López Aguilar y col utilizaron FT-MIR y análisis estadístico multivariado para diferenciar mezcales elaborados con cuatro especies de agave [9].

RESULTADOS

El proyecto “Estudio preliminar de tres especies de agaves por FT-IR”, fue desarrollado en el Llaboratorio de Análisis de Agaves nativos y sus destilados, con la participación de un estudiante nivel licenciatura de la Universidad Tecnológica de Cadereyta. El análisis por FT-IR permitió identificar similitudes y diferencias en la composición química de las tres especies de agave estudiadas (M1, M2 y M3) (figura 4). Al analizar la región entre 800 y 1800 cm^{-1} se observaron señales asociadas a vibraciones características de carbohidratos, lignina y otros compuestos estructurales (figura 5). En la banda comprendida entre ~1030–1050 cm^{-1}, correspondiente al estiramiento C–O de alcoholes y carbohidratos, se observó una señal presente en las tres muestras, aunque con distinta intensidad. La muestra M2 mostró la mayor intensidad, lo que sugiere un mayor contenido relativo de azúcares o polisacáridos, en comparación con M1 y M3.
Respecto a la banda entre ~1100–1200 cm^{-1}, puede ser atribuida al estiramiento C–O de lignina y hemicelulosa, M1 presentó una señal más intensa, indicando una mayor proporción de compuestos lignocelulósicos. Las regiones ~1400–1450 cm^{-1}, (deformación de C–H y COO^{-}), y ~1600–1650 cm^{-1} (estiramiento del grupo carbonilo (C=O)) se observaron bandas con intensidades variables. M2 presentó una leve desviación en la posición de la banda, lo que podría indicar la presencia de un entorno químico ligeramente distinto o una combinación de características presentes en las otras dos muestras. Estos son resultados preliminares pues se recomienda complementar este estudio con un análisis estadístico multivariado, como el Análisis de Componentes Principales (PCA). A pesar de ello, estos datos concuerdan con Mellado-Mojica y col., quienes concluyeron en su

investigación que la espectroscopia MIR permite la clasificación y discriminación del agave y otros jarabes naturales, además que el perfil de carbohidratos de los jarabes de agave puede utilizarse como indicador de autenticidad [10]. Este tipo de proyecto son muy importantes ya que contribuyen al conocimiento de la diversidad química de los agaves de la región.

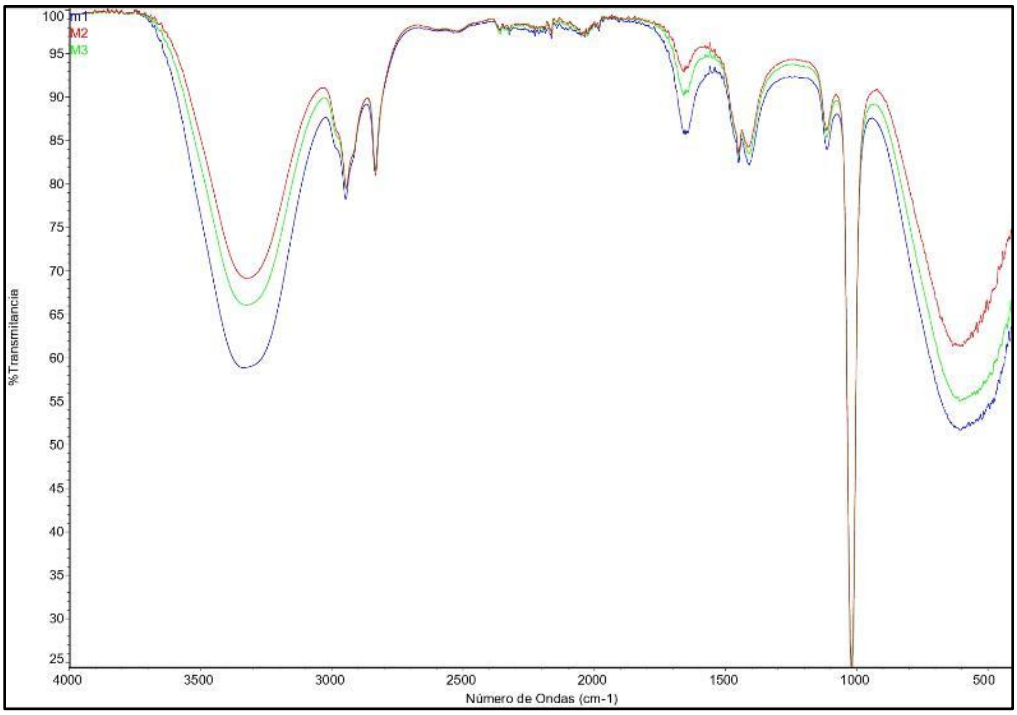


Figura 4. Espectro FTIR de las tres especies de agaves analizadas.

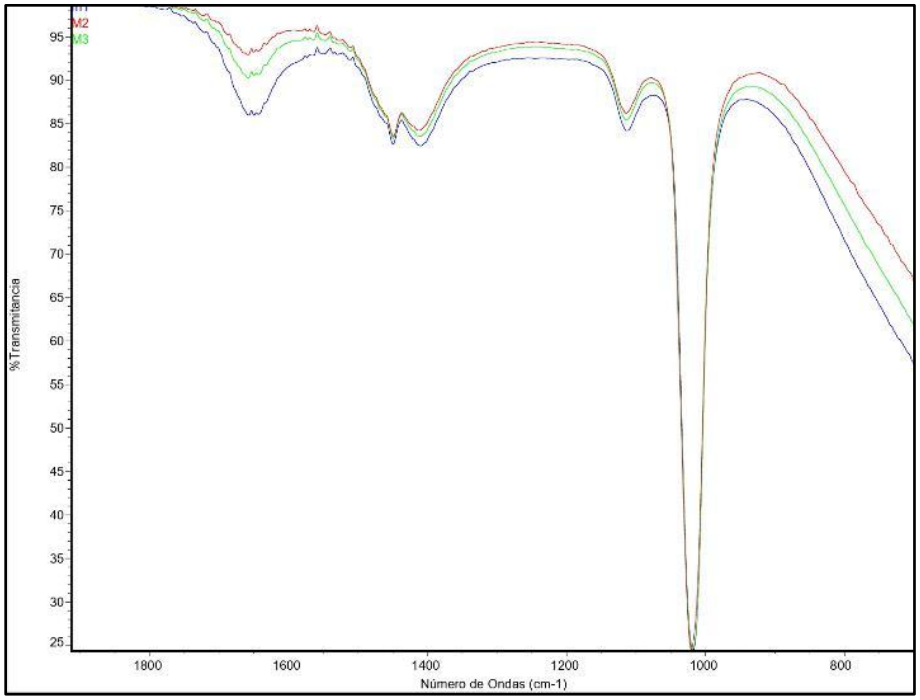


Figura. 5. Comparación de las 3 especies en la región de azúcares.
Otros de los resultados del laboratorio en este corto tiempo de funcionamiento, es la realización del monitoreo al proceso de destilación efectuada el 28-01-2025. El análisis espectroscópico mediante FT-IR permitió analizar las fracciones *punta*, *cuerpo* y *cola* obtenidas durante la destilación de *Flammam*. Los espectros obtenidos evidencian diferencias notables en la composición química de cada fracción, reflejando el comportamiento dinámico del proceso de separación por volatilidad (figura 6).

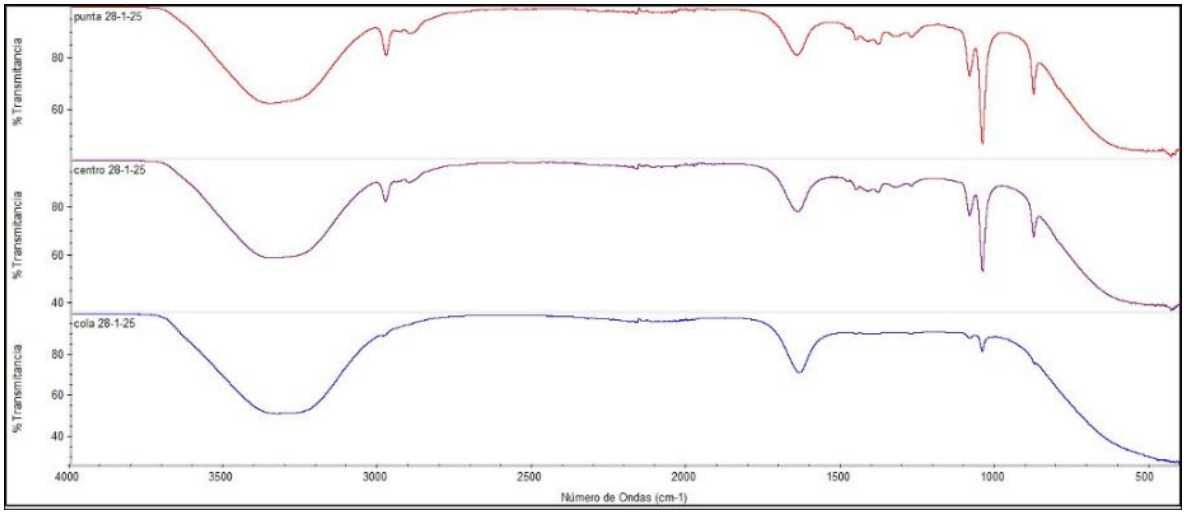


Figura 6. Monitoreo del proceso de destilación (28-01-2025).

La fracción *punta* mostró un espectro con transmitancia elevada en la mayoría de las regiones, lo que sugiere una menor concentración de compuestos pesados y una mayor proporción de componentes volátiles. Se identificó una banda ancha en la región de 3300–3400 cm^{-1}, atribuida al estiramiento O–H, característica de alcoholes ligeros como metanol. Asimismo, se observaron múltiples señales en la región de 1000–1300 cm^{-1}, asociadas a vibraciones C–O y C–C, que corresponden a compuestos oxigenados de bajo peso molecular. La fracción *cuerpo*, correspondiente a la porción intermedia del proceso, presentó un perfil espectral más equilibrado, con bandas definidas en la región O–H (~3300 cm^{-1}) y C–H (~2900 cm^{-1}), así como señales en la zona de 1050–1150 cm^{-1}, relacionadas con la presencia de etanol y otros alcoholes superiores. Este espectro evidencia una composición química más balanceada, representativa del perfil deseado en el producto final. En contraste, la fracción *cola* mostró una mayor absorción en todo el espectro, particularmente en la región de 1600–1700 cm^{-1}, donde se sitúan las vibraciones de grupos carbonilo (C=O), como aldehídos, ácidos orgánicos o compuestos fenólicos. Además, se observó un incremento en la banda O–H, lo que puede indicar una mayor presencia de agua u otras sustancias no deseadas. Estos resultados validan la decisión de descartar esta fracción. El análisis por FT-IR de las fracciones del proceso de destilación demuestra ser una herramienta eficaz para evaluar la composición química del destilado en tiempo real. Esta técnica contribuye al aseguramiento de la calidad, a la estandarización del producto y al cumplimiento de la NOM-070-SCFI-2016.

CONCLUSIONES

El presente trabajo documenta la apertura del laboratorio especializado para el análisis de agaves nativos y sus destilados, como parte de un esfuerzo científico y social liderado por la UANL. Aunque es un laboratorio de reciente creación, los estudios realizados hasta el momento han demostrado que el uso de herramientas analíticas como la espectroscopía FT-IR y la cromatografía de gases permite caracterizar la composición química tanto de la materia prima como de los destilados, y resultan útiles para asegurar la calidad del producto final.

La creación de este laboratorio no solo beneficia al proyecto *Flammam*, sino también a los productores locales para el análisis de sus destilados, además de fomentar la investigación aplicada y promover la formación de recursos humanos. En el futuro, se contempla la expansión de sus capacidades analíticas mediante la incorporación de la espectroscopía de absorción atómica, para ampliar el análisis hacia la detección de metales pesados. La vinculación entre la ciencia y la tradición contribuye a garantizar la autenticidad, calidad y competitividad de los destilados de agave a nivel nacional e internacional.

BIBLIOGRAFÍA

1. Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6437/seeco11_C/seeco11_C.html
2. A. Peña-Alvarez, L. Díaz, A. Medina, C. Labastida, S. Capella, and L. E. Vera, “Characterization of three Agave species by gas chromatography and solid-phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry,” J Chromatogr A, vol. 1027, 1–2, 2004, pp. 131–136.
3. M. D. C. Chávez-Parga, E. Pérez Hernández, and J. C. González Hernández, “Revisión del agave y el mezcal,” Rev Colomb Biotecnol, vol. 18, 1, 2016.
4. A. M. Vera Guzmán and P. A. Santiago García, “Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*,” Revista fitotecnia mexicana, vol. 32, 4, 2009.
5. J. A. Molina-Guerrero and J. E. Estrada-Baltazar, “Compuestos volátiles en el mezcal,” Rev Mex Ing Quim, vol. 6, 1, pp. 41–50, 2007.
6. C. M. Rodríguez-Peralta, J. Pardo-Núñez, and A. P. Aldrete-González, “El entorno competitivo del mezcal: La estrategia de las grandes compañías de bebidas espirituosas frente a los pequeños productores de mezcal,” Revista de Desarrollo Económico, 2019, pp. 17–30.
7. UANL, “MezcalFlammamUANL.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: https://www.fcfm.uanl.mx/destilado
8. M. A. Quintero Arenas, O. G. Meza-Márquez, J. L. Velázquez-Hernández, T. Gallardo-Velázquez, and G. Osorio-Revilla, “Quantification of adulterants in mezcal by means of FT-MIR and FT-NIR spectroscopy coupled to multivariate analysis,” CyTA - Journal of Food, vol. 18, 1, 2020, pp. 229–239.
9. R. López Aguilar, E. Hernández Núñez, A. Hernández Montes, H. Zuleta Prada, and J. E. Herbert Pucheta, “Differentiation of mezcales from four agave species using FT-MIR and multivariate statistical analysis,” Biotecnia, vol. 26, 2024, pp. 293–305.
10. E. Mellado-Mojica and M. G. López, “Identification, classification, and discrimination of agave syrups from natural sweeteners by infrared spectroscopy and HPAEC-PAD,” Food Chem, vol. 167, 2015, pp. 349–357.

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE FERTILIZANTES SOSTENIBLES A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

María de la Luz Delgadillo Torres[1], Maria de los Ángeles Vargas Hernández[1], Mariana Bárcenas Castañeda[1], Francisco Javier Pérez Ramírez[1], Arturo Aguilar Pérez[2], Jacinto Cortés Pérez[2]

[1]TecNM/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. [2]UNAM/ Facultad de Estudios Superiores Aragón

RESUMEN

La agricultura sostenible ha despertado un creciente interés a nivel mundial debido a la necesidad urgente de garantizar la seguridad alimentaria y preservar los recursos naturales. En este contexto, la búsqueda de alternativas orgánicas y ambientalmente responsables se ha vuelto esencial para mejorar la fertilidad del suelo y optimizar la productividad agrícola. Una opción prometedora es el uso de harina de carne, un subproducto de la industria cárnica, que se caracteriza por su elevado contenido de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, como nitrógeno, fósforo, potasio y diversos oligoelementos. El aprovechamiento de la harina de carne como fertilizante orgánico en la agricultura ofrece múltiples beneficios, entre ellos la mejora de la salud del suelo, la estimulación del crecimiento vigoroso de las plantas y el aumento en la calidad y el rendimiento de los cultivos. No obstante, su aplicación también enfrenta desafíos significativos, como garantizar la seguridad alimentaria, gestionar adecuadamente los residuos y asegurar su sostenibilidad ambiental. En este estudio, se evaluó la eficiencia de fertilizantes orgánicos elaborados a partir de harinas obtenidas como subproductos de la industria cárnica. Se realizaron análisis fisicoquímicos para determinar su contenido nitrógeno, humedad, cenizas, grasa, calcio, proteína y fósforo, elementos relevantes para la fertilidad del suelo. Los resultados mostraron que las harinas cárnicas poseen un alto contenido de nutrientes esenciales que pueden ser aprovechados para mejorar la calidad del suelo y promover un crecimiento vegetal adecuado.

INTRODUCCIÓN

La agricultura sostenible ha cobrado una relevancia creciente a nivel global debido a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria y optimizar el uso de los recursos naturales. En este contexto, la búsqueda de insumos orgánicos que mejoren la fertilidad del suelo y optimicen la productividad agrícola se ha convertido en un área de interés estratégico. La harina de carne, un subproducto de la industria cárnica presenta un alto contenido de macronutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio, además de oligoelementos clave para el desarrollo vegetal. Su aplicación como fertilizante orgánico representa una alternativa potencial para mejorar la calidad del suelo, promover un crecimiento vegetal vigoroso y optimizar el rendimiento de los cultivos.

Estudios previos han demostrado la efectividad de estas harinas en la mejora de la fertilidad del suelo y el rendimiento de diversos cultivos. Chávez y colaboradores (2004) realizaron la valoración de harinas cárnicas como fertilizante orgánico, demostrando que la aplicación de harinas cárnicas en un suelo de cultivo como fertilizante nitrogenado y fosforado no produjeron ningún perjuicio en el cultivo de lechuga y maíz [Chaves et al., 2004]. De forma semejante, Chipana (2019) encontró que la harina de cuernos y pezuñas de bovino es una fuente prometedora de nitrógeno, mejorando variables agronómicas en maíz [Chipana, 2019]. Por otro lado, Jeng y colaboradores (2007) establecieron que el uso de harina de carne y hueso incrementa el rendimiento en cultivos como trigo y cebada, siendo una fuente eficiente de nitrógeno y fósforo; debido a que contiene nitrógeno total (~8%), fósforo (~5%) y calcio (~10%) [Jeng et al., 2007]. Del mismo modo, Nogalska y colaboradores (2012) instauraron que el uso de cantidades elevadas de harina de carne y hueso cumplen con los requerimientos de cultivos de maíz [Nogalska et al., 2012]. Estas investigaciones evidencian que el aprovechamiento de subproductos no convencionales como fertilizantes orgánicos

de origen cárnico pueden contribuir en mejorar la productividad agrícola y promover prácticas más sostenibles.

Sin embargo, el uso de la harina de carne como insumo agrícola presenta desafíos técnicos y ambientales, tales como la seguridad alimentaria, la gestión de residuos y su impacto en la sostenibilidad del sistema agroalimentario. El presente trabajo tiene como propósito evaluar la eficiencia de fertilizantes elaborados a partir de residuos agroindustriales; por medio de la caracterización de la composición química de la harina de carne, evaluando parámetros fisicoquímicos como el contenido de nitrógeno (%N), humedad (%H), cenizas (%C), grasa (%G), calcio (%Ca), proteína (%Prot) y fósforo (%P); para establecer la viabilidad de estos subproductos como insumos agrícolas sostenibles y su potencial para la reducción de residuos agroindustriales.

TEORÍA

La fertilización tiene como objetivo principal aumentar las reservas de nutrientes en el suelo, mejorar las condiciones nutritivas de las plantas y, en consecuencia, aumentar su rendimiento. A medida que se logran buenos rendimientos en condiciones favorables de clima, riego y cultivo, así como teniendo en cuenta el tiempo que el suelo ha sido explotado, es necesario aplicar una fertilización más equilibrada que incluya, además de los tres principales nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), nutrientes secundarios o micronutrientes [González-Pérez, 2017; López-Martínez 2020].

1. Fertilizantes orgánicos.

El uso de abonos orgánicos ha sido una de las prácticas más antiguas y extendidas en la agricultura orgánica; para mejorar la calidad del suelo. Mientras que el uso de fertilizantes orgánicos son empleados para nutrir plantas o vegetales. Los fertilizantes orgánicos están compuestos de desechos animales o vegetales. Los fertilizantes de desechos animales son el material excretado por animales comúnmente de granja (gallinaza, borregaza, cerdaza, vacaza, etc.) y harinas cárnicas de diferentes especies de ganado, peces y aves. Por otro lado, el fertilizante de origen vegetal es obtenido a partir de desechos agrícolas como: composta, bokashi, lixiviados, harinas vegetales, bioles y pulpa de café o cacao. El fertilizante orgánico puede ser aplicado de dos maneras: directamente en forma fresca o seca, o bien en forma procesada como abono líquido o en forma de compostas aeróbicas o anaeróbicas [González-Pérez, 2017; López-Martínez, 2020].

Los fertilizantes orgánicos presentan diferentes ventajas y desventajas, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Ventajas de desventajas de fertilizantes orgánicos [Cerisola, 2015].*

Ventajas	Desventajas
1) Aumentan la materia orgánica, lo que mejora la aireación, retención de agua y actividad microbiana 2) Liberan nutrientes lentamente, lo que evita la sobre fertilización y reduce el riesgo de quemar las plantas. 3) Estimulan el crecimiento de microorganismos benéficos que ayudan a transformar nutrientes y proteger raíces. 4) Residuos agrícolas, alimentarios o estiércoles, ayudando al reciclaje orgánico. 5) Bajo riesgo de contaminación de aguas subterráneas. 6) Su costo es relativamente bajo y éste depende fundamentalmente de la disponibilidad a nivel regional	1) El abono orgánico al descomponerse consume una gran cantidad de oxígeno y produce anaeróbicamente productos tales como el dióxido de carbono, amonio y el sulfuro de hidrógeno y aeróbicamente, dióxido de carbono, nitratos y ácido sulfúrico, lo que puede poner en peligro la vida de los organismos bajo cultivo, cuando se aplican en exceso. 2) No son adecuados cuando se requiere un efecto rápido o en cultivos de alto rendimiento 3) Requiere aplicar mayor cantidad para obtener el mismo aporte que un fertilizante químico. 4) Si no está bien compostado, puede llevar semillas de malezas o microorganismos no deseados.

En el mismo tenor, las características fisicoquímicas deseables que deben poseer los fertilizantes orgánicos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Componentes químicos deseables en fertilizantes orgánicos [Tiquia-Tam, 2002; Moral et al., 2005, Díaz et al., 2007; Bernal et al., 2009].*

Componente	Porcentaje recomendado (%)	Función principal
Nitrógeno (N)	1.5 – 3.0	Promueve el crecimiento vegetal y el verdor de las hojas
Fósforo (P_2O_5)	0.5 – 1.5	Favorece el desarrollo de raíces y la floración
Potasio (K_2O)	1.0 – 2.5	Mejora la resistencia de la planta y la calidad del fruto
Materia orgánica	30 – 60	Mejora la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua
Carbono (C)	15 – 40	Fuente de energía para microorganismos del suelo
Relación C-N	10 – 20	Estabilidad del compost y adecuada mineralización
Humedad	30 – 50	Facilita la actividad microbiana y la descomposición

2. Harinas cárnicas como fertilizante.

El uso de harinas cárnicas como fertilizante produce una acidificación del suelo, lo cual, puede ser debido a las distintas sustancias que se liberan en las reacciones que sufre la materia orgánica al ser incorporada al suelo, tales como ácidos orgánicos y CO_2, que al reaccionar con el agua produce ácido carbónico. Se comprobó que existe una tendencia al aumento de la salinidad, pero la aplicación de las harinas cárnicas da valores menores de conductividad eléctrica que la aplicación del fertilizante mineral. A pesar de la baja tolerancia a la salinidad de determinadas especies hortícolas, no es probable que puedan ser afectadas al aplicar este material [Chaves et al., 2004].

Otro parámetro de importancia que se modifica ligeramente es la materia orgánica, la cual sufre un ligero aumento, por lo que sucesivas aplicaciones de estos materiales podrían seguir aumentándola y esto aportaría mejoras en la estructura del suelo, en la aireación y en la capacidad de retención de agua. El nitrógeno orgánico aumenta para todas las dosis de harinas cárnicas. Se anexa la tabla de características analíticas de dos carnes utilizadas como fertilizante (ver Tabla 3).

Tabla 3*. Características analíticas de dos tipos de harinas cárnicas [Chaves et. al, 2004].*

Parámetro	Harina de carne rojo
% Calcio	0.45-10.9
% Nitrógeno	8.9-10.4
% Humedad	5-13.5
% Fosforo	0.69-6.23
% Ceniza	20-30
% Grasa (Carne magra)	4-8
% Grasa (Carne mayor contenido graso)	10-30
% Proteína	30-60

3. Determinaciones

El método Kjeldahl es ampliamente utilizado en química analítica para determinar el contenido de nitrógeno en una muestra, especialmente en alimentos, suelos y fertilizantes. Este método permite estimar la cantidad de proteína en una muestra, dado que el nitrógeno es un componente principal de las proteínas; tal como se muestra en la Ecuación 1 [Gómez et al. 2019; López, 2015; González, 2014]:

$$\%\boldsymbol{Nitrogeno} = \frac{(\boldsymbol{ml\ acido\ valorante - ml\ blanco}) * \boldsymbol{N\ del\ ácido} * \boldsymbol{1.4007}}{\boldsymbol{peso\ de\ la\ muestra\ en\ gramos}} \quad \ldots . (\boldsymbol{1})$$

Donde: *ml de ácido valorante* es el volumen de la solución ácida utilizada para titular la muestra obtenida a partir de la digestión y destilación de la muestra. *ml de blanco* es el volumen de ácido valorante consumido en un blanco o una muestra de control sin muestra real, que consiste solo los reactivos utilizados. Para corregir errores sistemáticos en las mediciones debidos a impurezas en los reactivos o a otras condiciones experimentales. *N del ácido* es normalidad del ácido usado y titulado, mide la concentración de esta sustancia. La constante 1.4007 es el factor de conversión, que relaciona el número de moles (N) y el porcentaje en masa en la muestra. *Peso de la muestra en gramos* representa la Masa de la muestra que se analizó.

Para obtener el porcentaje de proteína, el valor obtenido del porcentaje de nitrógeno se multiplica por un factor especifico [Gómez et al. 2019]. El factor depende del tipo de muestra y se basa en la proporción promedio de nitrógeno en las proteínas (ver Ecuación 2).

$$\boldsymbol{Factor = \frac{100}{16} = 6.25} \quad \ldots.(2)$$

El factor constante de 6.25 es obtenido tomando en consideración que las proteínas contienen un promedio del 16% de nitrógeno. La Ecuación 3 es comúnmente utilizada para obtener el porcentaje de proteína [Gómez et al., 2019; López, 2015].

$$\%\boldsymbol{Proteína} = (\%\boldsymbol{Nitrogeno})(\boldsymbol{6.25}) \quad \ldots.(3)$$

En la industria agroalimentaria, la determinación del contenido de humedad en productos orgánicos es especialmente importante, debido a que la cantidad de agua contribuye en gran medida a las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los alimentos. Un bajo porcentaje de humedad contribuye a la conservación de alimentos. Mientras que, un alto contenido de humedad contribuye al crecimiento bacteriano, la proliferación de hongos y la descomposición. Por lo tanto, el control de humedad es esencial para evitar la contaminación microbiológica. Para la determinación de la humedad se utiliza la Ecuación 4 [Gómez et al. 2019; Pérez 2018]:

$$\%\boldsymbol{Humedad} = \frac{\boldsymbol{Peso\ de\ agua\ en\ la\ muestra}}{\boldsymbol{Peso\ de\ la\ muestra\ humeda}} * \boldsymbol{100} \quad \ldots..(4)$$

El *Peso de agua en la muestra* es la cantidad de agua contenida en la muestra, que se obtiene por diferencia de peso después de haber secado la muestra. Generalmente, se mide antes y después del proceso de deshidratación, restando el peso inicial de la muestra con el peso final seco. El *Peso de la muestra húmeda* representa el peso de la muestra tal como se encuentra al momento de realizar la medición, antes de cualquier proceso de secado. Es la masa total que incluye tanto el agua como los sólidos en la muestra.

PARTE EXPERIMENTAL

Inauguralmente, se acopiaron muestras de desperdicios cárnicos en tres diferentes rostros del área metropolitana. El material orgánico se limpió de forma manual, para eliminar la mayor parte de grasa. La muestra cárnica limpia se colocó en un vaso de precipitados y se agregó agua desionizada (en una proporción 1:1), la muestra se calentó a 520°C hasta obtener una mezcla homogénea. Consecutivamente se vertió la mezcla a tubos de ensayo para su centrifugación (700rpm durante 4min). Se extrajo la impureza y se conservó la muestra pura.

Para el proceso de digestión, se utilizaron tubos para digestión en los cuales se agregó 0.5 gramos de muestra y 10 mililitros de ácido sulfúrico. Se precalentó el digestor a una temperatura de 420°C, el extractor trabajó a máxima potencia durante cinco minutos y después por 55 minutos a potencia media. A cada tubo se le vertió un gotero de peróxido de hidrógeno con la finalidad de evitar la emulsión y un posible derrame de ácido sulfúrico. Una vez transcurrido el tiempo, se dejaron enfriar los tubos hasta que ya no se percibieran vapores y que la coloración en cada tubo pasara de una

coloración verde esmeralda a una azul celeste. Con las muestras obtenidas, se efectuó la destilación, utilizando matraces Erlenmeyer de 250ml se agregaron 30 ml de ácido bórico. Consecutivamente, se titularon las muestras destiladas aforando una bureta con ácido clorhídrico al 0.1 N, con un pH de 4.6. Los destilados se titulan hasta pasar de una coloración verde esmeralda a un color púrpura, con pH de 4.6 (con un margen de diferencia de +0.1 o -0.1). Es importante resaltar que los datos obtenidos en el proceso de digestión-destilación-titulación son empleados para determinar el porcentaje de nitrógeno (Ecuación 1) y porcentaje de proteína (Ecuación 2).

Consecutivamente, para realizar el análisis de humedad, en charolas de metal se colocaron 2 gramos de la muestra cárnica pura, las charolas se metieron al horno por 2 horas a 100°C. Una vez transcurrido el tiempo, se dejaron enfriar en el desecador hasta llegar a la temperatura ambiente. El porcentaje de humedad se determinó por medio de diferencias de pesos (ver Figura 1). Las muestras libres de humedad son utilizadas para determinar el porcentaje de cenizas, para lo cual, cada muestra se vertió a crisoles. Los crisoles se colocaron en la parrilla a 200°C hasta que las muestras dejaran de expulsar humo. Una vez que dejaron de humear los crisoles se llevaron a la mufla 600°C por 24 horas, posteriormente, los crisoles se enfriaron en un desecador (ver Figura 2).

Finalmente, se realizó el análisis de grasa, para este paso se utilizó la muestra cárnica limpia. En cartuchos del extractor de grasa se colocaron 0.5 gramos de muestra en papel filtro, los cartuchos se colocaron en el horno por dos horas. Posteriormente, se agregaron 50ml de éter de petróleo, para colocarlos en el equipo Soxtec, para lo cual se efectuaron cuatro ciclos de extracción (70min aproximadamente), consecutivamente se dejó enfriar por 30 min.

Figura 1. *Muestras de impureza y harina en charolas para humedad*.

Figura 2. *Crisoles con ceniza de carne.*

Para el análisis bromatológico se empleó un infraespectrofotómetro NIRS DS3F (ver Figura 3). Instrumento utilizado en el análisis de muestras mediante espectroscopia de reflectancia cercana al infrarrojo (NIRS, por sus siglas en inglés). Este tipo de espectroscopia se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, específicamente en la absorción, emisión o dispersión de la luz. Para este análisis se utilizó la muestra pura, obteniendo valores de porcentaje de: nitrógeno (%N), proteína (%Prot), humedad (%H), grasa (%G), cenizas (%C), calcio (%Ca) y fosforo (%P). La Figura 5, muestra el diagrama de bloques del desarrollo experimental.

Figura 3. *Infraespectofotómetro.*

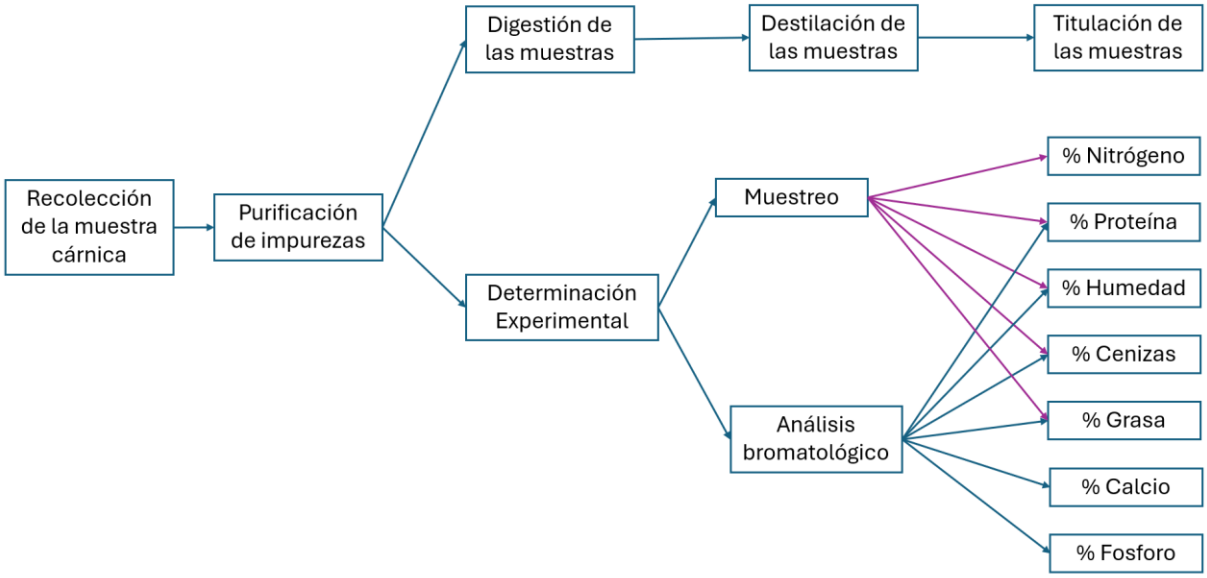


Figura 4. *Diagrama de desarrollo experimental.*

RESULTADOS

Los valores porcentuales de los parámetros fisicoquímicos obtenidos para establecer la viabilidad como fertilizante y contribuir a la reducción de contaminantes orgánicos; se muestran en la Tabla 4. La tabla presenta los resultados de la determinación experimental y análisis bromatológico de las muestras cárnicas; cabe resaltar que para cada análisis se utilizó una masa de 0.5 g de cada muestra.

Tabla 4. *Parámetros fitoquímicos de las muestras de estudio.*

Determinación	Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Experimental	Masa (g)	0.5065	0.5034	0.5035
	% Nitrógeno	3.18	3.64	6.11
	% Proteína	19.88	22.75	38.19
	% Humedad	5.55	6.52	4.88
	% Ceniza	20.17	26.74	32.6
	% Grasa	12.3	17.6	13.7
Análisis bromatológico	% Nitrógeno	5.35	5.85	6.72
	% Proteína	33.44	36.58	42.01
	% Humedad	5.08	5.57	4.95
	% Grasa	10.62	16.88	11.49
	% Ceniza	27.55	24.69	39.06
	% Calcio	19.28	19	16
	% Fosforo	6.17	6.04	6.15

En la determinación experimental se obtuvieron, valores de %N de 3.18, 3.64 y 6.11 de las muestras, los cuales se encuentran por debajo de los valores reportados en la bibliografía (%N=8.9-10.4). De forma semejante, los porcentajes de proteína obtenidos (19.88, 22.75 y 38.19) son inferiores comprados con los valores esperados de %Prot=30-60. Mientras que el %H (5.55, 6.52 y 4.88) posee valores dentro de los parámetros esperados (%H=5-13.5). Del mismo modo, el porcentaje de grasa (12.3, 17.6 y 13.7) exhibe valores porcentuales adecuados (%G=10-30). Con referencia al porcentaje de ceniza, se aprecia que para la muestra 1 (20.17) y 2 (26.74) se encuentran dentro de los valores analíticos (%C=20-30). Por otro lado, en el análisis bromatológico, los valores %N (5.35, 5.85 y 6.72) se encuentran por debajo del rango esperado (%N=8.9-10.4); mientras que %H (5.08, 5.57 y 4.95) se encuentra dentro del valor porcentual reportado en la bibliografía (%H=5-13.5); al igual que los valores correspondientes al porcentaje de cenizas, fosforo, proteína, y grasa. En cambio, los valores del contenido de calcio (19.28, 19 y 16) se encuentran por arriba del valor reportado (%Ca=0.45-10.9). Los bajos valores de nitrógeno, pueden estar asociados a la mala calidad de la muestra cárnica o al proceso térmico empleado, lo cual puede generar desnaturalización y pérdida de compuestos nitrogenados. También, el alto valor de calcio puede deberse a la presencia de residuos óseos (fosfato de calcio).

Los resultados obtenidos se representan gráficamente, como se aprecia en la Figura 5. En la cual se observa que los parámetros porcentuales de humedad y grasa presentan rangos similares en ambas determinaciones. Mientras que los valores de nitrógeno y proteína ostentan una notable diferencia entre ambos métodos. Específicamente el %N obtenido experimentalmente es 3.18, 3.54, 6.11 para cada muestra, y en el análisis bromatológico se alcanzó valores de 5.35 5.85 y 6.72, lo cual indica una diferencia mayor a 2% y 0.6 %N. De forma semejante el %Prot logrado experimentalmente es 19.88, 22.75 y 38.19 y en el análisis bromatológico es 33.44, 36.58 y 42.01; los valores manifiestan una diferencia mayor a 13% y 3.8 %Prot, respectivamente. Está marcada diferencia puede estar asociada a la pérdida de compuestos nitrogenados durante el proceso térmico.

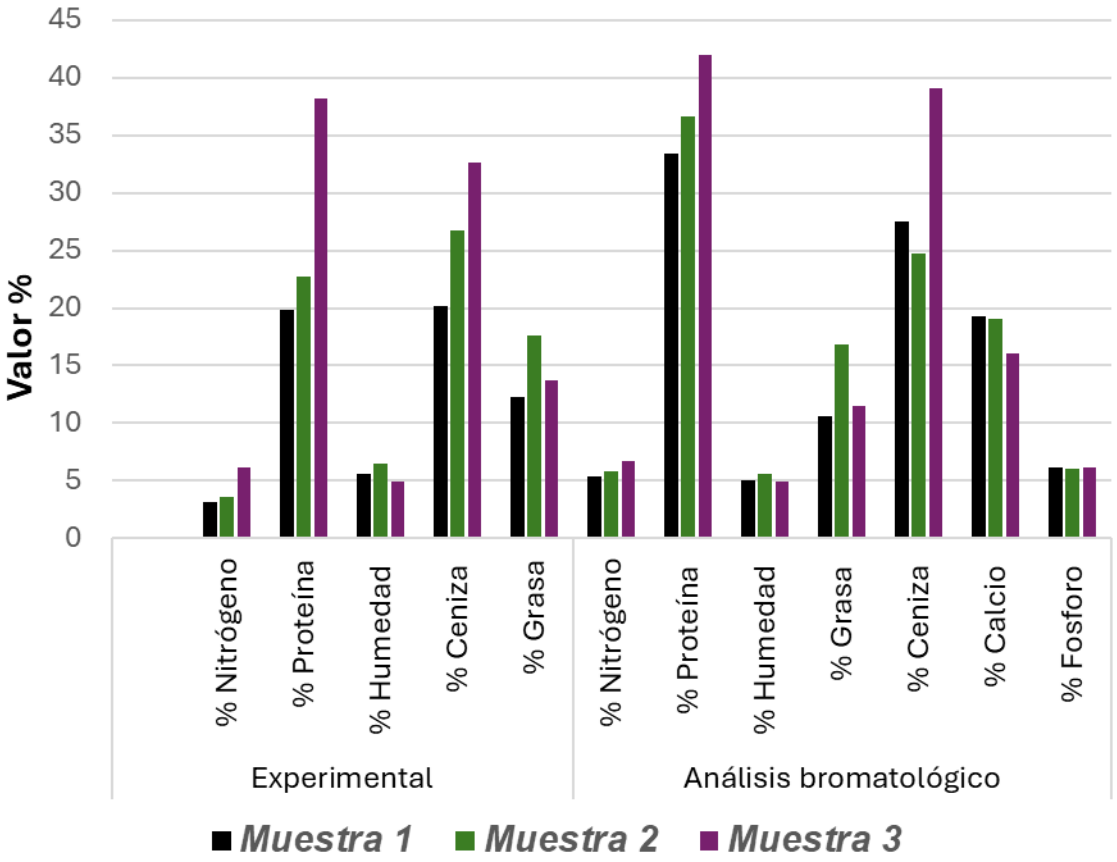


Figura 5. *Representación gráfica de los resultados obtenidos para cada muestra de estudio.*

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que las harinas cárnicas, subproductos de la industria agroalimentaria, tienen un gran potencial como fertilizantes orgánicos sostenibles. Gracias a su alto contenido de nutrientes clave como nitrógeno, fósforo, calcio y proteínas, además de una cantidad adecuada de materia orgánica, evidencia su viabilidad como una opción para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento saludable de las plantas. Si bien los niveles de nitrógeno y proteína en las muestras fueron un poco más bajos que los reportados en otros estudios, estas diferencias podrían deberse a factores como la calidad de la materia prima o las condiciones de calor durante el proceso de tratamiento. Cabe resaltar que, los análisis de laboratorio confirmaron que estos subproductos contienen nutrientes importantes en concentraciones relevantes y pueden utilizarse como fertilizante, siempre que se complemente con otras fuentes de nitrógeno para lograr un equilibrio adecuado de nutrientes, esenciales para mejorar las propiedades del suelo en la agricultura. Asimismo, aprovechar residuos agroindustriales como fuente de fertilizantes no solo ayuda a manejar mejor los desechos, sino que también contribuye a reducir la contaminación orgánica y a avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bernal, M., Alburquerque, J. & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *A review. Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.
2. Cerisola, C. (2015). Fertilidad química. *Facultad de ciencias agrarias y forestales.* Recuperado de https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/75204/mod_resource/content/1/UDD%20D8.1%20Fertilidad%20Qu%C3%ADmica%20.pdf
3. Chaves, C., Marín, J., Canet, R., Albiach, R., Pomares, F. & Boix, R. (2004). Valoración de harinas cárnicas como fertilizante orgánico. *Suelos y fertilizantes*, 1069-1081.
4. Chipana, S. (2019). Aprovechamiento de la harina de cuernos y pezuñas de bovino como fertilizante para el desarrollo de Zea mays L. variedad marginal 28 tropical en condiciones de invernadero (Tesis de licenciatura). *Universidad Privada del Norte*. Recuperado de http://hdl.handle.net/11537/23464
5. Díaz, M., Madejón, E., López, F., López, R. & Cabrera, F. (2007). Compost as a substitute for peat in potting media: Effects on growth and nutrient uptake of tomato plants. *Bioresource Technology*, 98(11), 2567–2573.
6. Gómez, L., Martínez, N., Enríquez, I., Garza, F., Nájera, J. & Quiñonez M. (2019). Análisis proximal y de composición mineral de cuatro especies de hongos comestibles silvestres del estado de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(1), e901110. Recuperado de https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.184
7. González, M. & Pérez, L. (2017). Fertilización nitrogenada y su efecto en el rendimiento y en el contenido de nitrógeno en el grano de arroz. *Cultivos Tropicales*, 38(4), 11-16.
8. González, R. (2014). Validación del método Kjeldahl para la determinación de proteínas en productos alimenticios. *Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado de https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000241826/3/0241826.pdf
9. Jeng, A., Haraldsen, T., Grønlund, A. & Pedersen, P. (2007). Meat and bone meal as nitrogen and phosphorus fertilizer to cereals and rye grass. In: Bationo, A., Waswa, B., Kihara, J., Kimetu, J. (eds) Advances in Integrated Soil Fertility Management in sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities. *Springer, Dordrecht.* Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5760-1_21
10. López, J. (2015). Validación para la determinación de proteínas en alimentos por el método de Kjeldahl. *Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado de https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000678967/3/0678967_A1.pdf
11. López, J. & Martínez, R. (2020). Efecto de la fertilización orgánica y química en el rendimiento de chile jalapeño (Capsicum annuum L.) en un suelo Vertisol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(3), 283-295.
12. Moral, R., Paredes, C. & Bustamante, M. (2005). Caracterización de fertilizantes orgánicos y enmiendas para su uso agrícola. *Revista de Ciencias Ambientales,* 19(2), 55–63.
13. Pérez, M. (2018). Determinación del contenido de humedad en granos de maíz duro: comparación de métodos. *Universidad de las Américas Puebla*. Recuperado de https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/10103/1/UDLA-EC-TIAG-2018-25.pdf
14. Ruiz, M., Montes, J., Castañón J., Gutiérrez, F., Hernández, M., López, H., Ruiz, V., & Villalobos, J. (2023). Uso de la harina del pez diablo (Pterygoplichthys spp.) en la fertilización orgánica del tomate (Solanum lycopersicum L.). Revista internacional de contaminación ambiental, 39, 54848. https://doi.org/10.20937/rica.54848
15. Tiquia, S. & Tam, N. (2002). Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, 37(8), 869–880.

PASTA DE SOYA COMO FUENTE PROTEÍNICA PARA EL ENRIQUECIMIENTO DEL ENSILADO DE AGAVE

Graciela M. L. Ruiz-Aguilar, Diana Angélica Gutiérrez-Arenas, Héctor Gordon Nuñez-Palenius, Sarai Camarena-Martínez, Maria Elena López-Pérez, Servando Reyes-Castro*

División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
*s.reyes@ugto.mx

RESUMEN

La falta de agua para la producción de forrajes es un problema que se ha incrementado en los últimos años, por lo que se deben buscar alternativas que disminuyan el uso de este recurso en la producción pecuaria. El agave podría representar una alternativa viable para la alimentación del ganado, ya que puede mantener una producción constante de biomasa sobre todo en la época seca del año, cuando las condiciones ambientales no son favorables para el crecimiento de los pastos. El bajo contenido de proteína en el ensilado de agave obliga a la inclusión de fuentes nitrogenadas, buscando mejorar sus características nutricionales. La pasta de soya representa la fuente de proteína vegetal más utilizada a nivel mundial en la alimentación animal. Por lo anterior, se evaluó la adición de pasta de soya en el ensilado de *Agave salmiana* y *Agave americana* a través de análisis de laboratorio para conocer el incremento de proteína cruda (PC) en el producto final. Se establecieron los siguientes tratamientos: T1 = Ensilado de *Agave salmiana* (EAS) 100%; T2 = 80% EAS + 20% pasta de soya (PS); T3 = Ensilado de *Agave americana* (EAA) 100%; T4 = 80% EAA + 20% PS, cada uno con tres repeticiones. El análisis bromatológico se realizó a través de la metodología de la AOAC (1975), además se determinaron nutrientes digestibles totales (NDT), energía digestible (ED) y energía metabolizable (EM) a través del método propuesto por Shimada (2018). Los resultados muestran diferencias en el contenido de PC en los tratamientos 1 y 3 (4.58% y 7.43% respectivamente), los tratamientos 2 y 4 no presentan diferencias entre sí (27.26% y 27.19% respectivamente) pero se observa un incremento muy marcado con relación a los tratamientos testigo (T1 y T3). Para los NDT, ED y EM, el EAS + 20% PS mostró los valores más altos (78.58%, 3.46 Mcal/kg, 2.84 Mcal/kg respectivamente) frente al EAA + 20% PS (62.26%, 2.74 Mcal/kg, 2.25 Mcal/kg respectivamente). El contenido de fibra cruda (FC) muestra una disminución importante con la adición de la pasta de soya, pasando de 29.75 a 19.79% en *A. salmiana*, y de 31.97 a 19.53% para *A. americana*. Estos resultados demuestran que la adición de pasta de soya en el ensilado de agave incrementa de manera significativa el contenido de proteína cruda y nutrientes digestibles totales, además de una disminución de cerca de diez puntos porcentuales en el contenido de FC, lo cual es deseable para su utilización como alimento animal, con miras a mantener el peso de los animales, y en algunos casos hasta la producción en la ápoca de secas. Análisis de digestibilidad de la materia seca son necesarios para tener un mejor panorama sobre la calidad del ensilado de agave con pasta de soya en la alimentación del ganado, específicamente en rumiantes.

INTRODUCCIÓN

La producción pecuaria en México se desarrolla principalmente bajo sistemas de pastoreo y dependen de la disponibilidad de forraje en el campo, lo que representa una ventaja económica debido a la disminución de costos, pero la vuelve vulnerable a las variaciones climatológicas, particularmente a las sequías (Partida *et al*., 2013).

En 2024 varios estados del país presentaron sequía en algún grado, en el total de su territorio, como Aguascalientes, Chihuahua, Ciudad de México, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Morelos, Querétaro y Sinaloa, y el 63% de los municipios a nivel nacional también presentaron este problema (CONAGUA, 2025), por lo que la búsqueda y evaluación de alternativas que contribuyan a cubrir la necesidad de alimentar al ganado es imperante, utilizando recursos que sean eficientes en el uso

del agua, disminuyendo la necesidad de riego y, por ende, la huella hídrica, minimizando el impacto ambiental de esta actividad.

Los agaves podrían representar una alternativa viable para la obtención de forraje, ya que son plantas adaptadas a ambientes secos, que toleran grandes periodos de sequía y pueden producir una gran cantidad de biomasa, además, los agaves son las plantas más reconocidas en las zonas áridas y semiáridas de México, consideradas especies clave en esas regiones (García, 2007).

Las hojas o pencas representan entre el 46 y el 48.5% del peso total de la planta de agave (Íñiguez-Covarrubias *et al*., 2001; Montañez-Soto *et al*., 2011; Montañez *et al*., 2011), las cuales son consideradas un residuo de las industrias del tequila y el mezcal, ya que solo se utiliza el tallo o piña en el proceso de elaboración de estas bebidas. Considerando que en el año 2023 se utilizaron 2,288,100 t de piña de agave para la producción de tequila (CRT, 2023) y 122, 396.55 t de piña para la elaboración de mezcal (COMERCAM, 2024) significa que se quedaron alrededor de 2,225,073 de t de hojas en campo, que podrían emplearse en la alimentación de rumiantes, como bovinos, ovinos y caprinos.

Diversos estudios muestran que las hojas de agave presentan un bajo contenido de proteína cruda, por lo que debe buscarse la inclusión de ingredientes que ayuden a mejorar este parámetro. Se ha demostrado que el uso de urea y pasta de soya en el ensilado de *Agave tequilana* incrementa el contenido de proteína cruda de manera importante, entre 31 y 39% (Reyes-Castro, 2022; Reyes-Castro *et al*., 2022), lo que podría convertirse en una opción para elevar el valor nutritivo en este forraje. Sin embargo, el uso de urea en la alimentación animal debe tomarse con cautela por el peligro que puede llegar a representar para los animales, mientras que la pasta de soya podría considerarse como una alternativa viable, siempre y cuando se consideren los costos y disponibilidad de esta en el mercado.

Por lo anterior, el presente trabajo busca evaluar el incremento en proteína cruda al ensilar hoja de agave mezclada con pasta de soya.

REVISIÓN DE LITERATURA

El agave

En México, la importancia del agave es de carácter agroecológico y socioeconómico debido a sus múltiples usos, ya que numerosos pueblos indígenas y mestizos lo han aprovechado durante siglos como fuente de alimento, bebida, medicina, combustible (leña), cobijo, ornato, fibras duras extraídas de las hojas (ixtle), abono, construcción de viviendas y elaboración de implementos agrícolas, entre otros usos (García, 2007; García-Herrera *et al*., 2010). Los ganaderos utilizan las hojas e incluso la piña de agave picada y combinada con esquilmos agrícolas como suplemento para sus animales, dado que proporcionan altos niveles de energía digestible, minerales y agua, además de aportar una buena cantidad de carbohidratos solubles que cubren los requisitos de mantenimiento y producción. Los agaves poseen un bajo contenido de proteína cruda (PC) en sus hojas, como se observa en el Cuadro 1, por lo que es necesario suplementar con ingredientes proteínicos a través de la inclusión de granos, leguminosas o pastas de oleaginosas, o bien, mediante una fuente de nitrógeno no proteico, mismo que las bacterias del rumen necesitan para digerir la fibra (García-Herrera *et al*., 2010).

Cuadro 1. Contenido de proteína cruda en las hojas de diferentes especies de agave.

Especie	% de PC	Autores
A. tequilana	2.6 – 5.2	Montañez-Soto *et al.* (2011); Ortíz-Torres *et al*. (2014); Jimenez-Muñoz *et al*. (2016).
A. salmiana	2.5 – 8.4	González (1994); Gómez (2003); Pinos-Rodríguez *et al*. (2008b); Mata-E. *et al*. (2011); Ortíz-Torres *et al*. (2014).
A. Mapisaga	2.6	Mata-E. *et al*. (2011).
A. americana	5.3	Gómez (2003).

Pasta de soya

La soya (*Glycine max*) es una planta leguminosa perteneciente a la familia *Fabaceae* y clasificada dentro del grupo de las oleaginosas. La pasta de soya es un subproducto de la extracción del aceite de las semillas de soya, y constituye una fuente de proteína (45-48%) y energía de alta calidad para la alimentación animal (Solá-Oriol, 2018; FEDNA, 2019).

La pasta de soya comúnmente utilizadas para la fabricación de pienso proceden del proceso de extracción por presión y solventes, además de un tratamiento térmico de la semilla, dando harinas con una alta concentración de proteína. Aunque este ingrediente posee ciertos factores antinutritivos, una gran cantidad de ellos son termolábiles, es decir, que se inactivan a ciertas temperaturas (Solá-Oriol, 2018; FEDNA, 2019).

Los valores nutricionales de la pasta de soya se pueden apreciar en el Cuadro 2, en cual se puede observar el alto contenido de proteína bruta, así como algunos macrominerales, además presenta una alta digestibilidad de la proteína en rumiantes (FEDNA, 2019), por lo que es uno de los ingredientes más utilizados en la alimentación animal.

Cuadro 2. Valores nutricionales de la pasta de soya.

Composición química (%)								**Mcal/kg**
Humedad	PB	Calcio	Fósforo	Magnesio	Potasio	Selenio	CDP	VE
12	45.5	0.29	0.62	0.27	2.2	0.42	90	2.85

Fuente: Tablas FEDNA 2019.

**PB= proteína bruta; CDP= coeficiente de digestibilidad de la proteína; VE= Valor energético.

Ensilado

Se denomina ensilado a todo material vegetal húmedo conservado por fermentación. Es un proceso natural donde la intervención de los microorganismos presentes en la masa ensilada crea un nivel de acidez tal, como producto de su propio metabolismo, que impide que otros microorganismos puedan descomponer o podrir el forraje (Silveira y Franco, 2006).

Es un método para conservar el material forrajero excedente, que se produce durante la época de lluvias, el cual consiste en la compactación del forraje, expulsión del aire y fermentación en un medio anaeróbico, que permite el desarrollo de bacterias que acidifican el material conservado, y que sirve para suplementar al ganado durante períodos de sequía, garantizando la alimentación de los animales durante esta época, y en general, durante todo el año (Wagner *et al*., 2013).

Este proceso permite almacenar alimento, conservando calidad y palatabilidad, lo cual puede contribuir a aumentar la carga animal por hectárea y sustituir el uso de concentrados. Su calidad es

afectada por la composición química de la materia a ensilar, el clima y los microorganismos empleados, entre otros. El ensilado se almacena en silos, que permiten mantener las condiciones necesarias para su conservación, existen varios tipos y la selección del apropiado depende del tipo de explotación ganadera, recursos económicos disponibles y topografía del terreno entre otros. En este proceso, el oxígeno es perjudicial porque habilita la acción de microorganismos aerobios que degradan el forraje ensilado hasta CO_2 y agua (Garcés *et al*., 2004).

Los estudios sobre la elaboración de ensilados de hojas de agaves enfocados en la alimentación animal se centran en dos especies: *A. salmiana* y *A. sisalana* (cuadro 3). Estos estudios muestran que el proceso de ensilaje afecta el pH, y el contenido de materia seca, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca.

Cuadro 3. Caracterización química del ensilado de hojas de *Agave salmiana* y *A. sisalana*.

ESPECIE	MS	PC	FDN	FDA	CEN	DIVMS	ELN	Referencias
	%							
A. salmiana	14.9-18.1	3.6-4.5	33.0-55.3	31.1-43.6	7.1-15.4	46.1	5.7	1,2,3
A. sisalana	17.6-27.4	4.6-6.9	25.1-46.8	20.1-28.0	12.0-12.2	NR	NR	4,5

Referencias: 1= Pinos-Rodríguez *et al.* (2008a); 2= Pinos-Rodríguez *et al*. (2008b); 3= Álvarez-Fuentes *et al.* (2015); 4= Nouel-Borges *et al*. (2013); 5= Souza *et al*. (2018).
MS= materia seca; PC= proteína cruda; FDN= fibra detergente neutro; FDA= fibra detergente ácido; CEN= cenizas; DIVMS= digestibilidad *in vitro* de la materia seca; ELN= extracto libre de nitrógeno; NR= No reportado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en el municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, localizado en la zona centro-este del Estado de Guanajuato, colinda al norte con los municipios de Dolores Hidalgo y San Luis de la Paz; al este con el municipio de San José Iturbide y el Estado de Querétaro; al sur con el Estado de Querétaro y los municipios de Apaseo el Grande, Comonfort y Santa Cruz de Juventino Rosas; al oeste con los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas, Salamanca y Dolores Hidalgo. El municipio presenta un clima BSh (semiárido cálido) de acuerdo con la clasificación climática de Köpen modificada por Enriqueta García (1998).

Se utilizaron hojas de plantas adultas de *Agave salmiana* y *Agave americana* antes de presentar escapo floral. Una vez cortadas las hojas de *A. salmiana* se dejaron reposar en campo por 30 días antes de la molienda para disminuir el contenido de humedad, para el caso de *A. americana* el material sólo se dejó reposar por tres días.

La pasta de soya se adquirió en un comercio local, marcando 45% de proteína cruda en la etiqueta.

La molienda de las hojas de agave se realizó con una máquina picadora especializada para tal fin, con mecanismo de martillos y cuchillas accionadas mediante toma de fuerza de un tractor a 5,000 rpm, a un tamaño de partícula aproximada de 2 cm.

Una vez picado el material, se pesó y se adicionó la pasta de soya de acuerdo con cada tratamiento, mezclando hasta obtener un material homogéneo.

Se elaboraron microsilos en botes de plástico con tapa de cierre hermético, dentro de éstos se colocó una bolsa de polietileno con dos kg de material mezclado, se presionó de manera manual para

eliminar aire, antes de sellar las bolsas se usó una aspiradora comercial para uso doméstico con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de aire presente en el microsilo.

Se realizaron los siguientes tratamientos: T1 = Ensilado de *Agave salmiana* (EAS) 100%; T2 = 80% EAS + 20% pasta de soya (PS); T3 = Ensilado de *Agave americana* (EAA) 100%; T4 = 80% EAA + 20% PS, cada uno con tres repeticiones.

Una vez sellados los microsilos se almacenaron a la sombra y en un lugar seguro para evitar ruptura o daño que permitiera entrada de aire y así poder realizar los análisis posteriores. Los microsilos se abrieron a los 60 días y se procedió con el análisis bromatológico para conocer su composición química de acuerdo con la metodología de la AOAC (2002). La determinación de nutrientes digestibles totales, energía digestible y energía metabolizable fueron calculados a través del método propuesto por Shimada (2018).

RESULTADOS

Los resultados del análisis bromatológico realizado a los ensilados se muestran en el Cuadro 4, en donde se puede observar una reducción del contenido de humedad en el ensilado de ambas especies de agave al adicionar pasta de soya, pasando de 88.64 y 80.48% a 71.75 y 72.05% en *A. salmiana* y *A. americana* respectivamente, así como una reducción importante en el contenido de fibra cruda, pasando de 29.75 a 19.79% en *A. salmiana* y de 31.97 a 19.53% en *A. americana*, lo cual es deseable, considerando que este parámetro tiene un impacto directo sobre el consumo voluntario de alimento, debido a que, a mayor contenido de fibra, éste ocupa más espacio en el rumen, limitando el consumo.

Cuadro 4. Caracterización química del ensilado de agave con pasta de soya.

PARÁMETRO	*A. salmiana*		*A. americana*	
	Testigo	PS (20%)	Testigo	PS (20%)
Humedad (%)	88.64	71.75	80.48	72.05
EE (%)	1.14	13.24	5.84	4.26
PC (%)	4.58	27.26	7.43	27.19
Cenizas (%)	13.91	9.10	19.42	15.49
FC (%)	29.75	19.79	31.97	19.53
ELN (%)	50.62	30.61	35.34	33.53
NDT (%)	56.05	78.58	58.12	62.26
ED (Mcal/kg)	2.47	3.46	2.56	2.74
EM (Mcal/kg)	2.03	2.84	2.10	2.25
pH	4.06	4.19	5.01	4.63

**EE= Extracto etéreo; PC= Proteína Cruda; FC= Fibra cruda; ELN= Extracto libre de nitrógeno; NDT= Nutrientes digestibles totales; ED= Energía digestible; EM= Energía metabolizable.

Los valores de proteína cruda se elevan de manera significativa al adicionar pasta de soya en el ensilado, de 4.58 a 27.26% en *A. salmiana* y de 7.43 a 27.19% en *A. americana*, al igual que los valores de nutrientes digestibles totales, los cuales aumentan de 56.05 a 78.58% en el ensilado de *A. salmiana* y de 58.12 a 62.26% en *A. americana.*

La energía digestible (ED) y metabolizable (EM) mostraron un incremento mayor en el ensilado de *A. salmiana* respecto al ensilado de *A. americana* al adicionar pasta de soya. Para ED el valor pasó de 2.47 a 3.46 Mcal/kg y de 2.56 a 2.74 Mcal/kg en *A. salmiana* y *A. americana*, respectivamente. El valor de EM pasó de 2.03 a 2.84 Mcal/kg y de 2.10 a 2.25 Mcal/kg para *A. salmiana* y *A. americana,* respectivamente.

El incremento en el valor de la proteína cruda, al adicionar pasta de soya al ensilado de agave, puede observarse en la Figura 1, donde el valor en ambas especies de agave es muy similar en el producto final, aunque también se observa que los valores de proteína iniciales son mayores en el caso del *A. americana* con respecto al de *A. salmiana* (7.43 y 4.58% respectivamente).

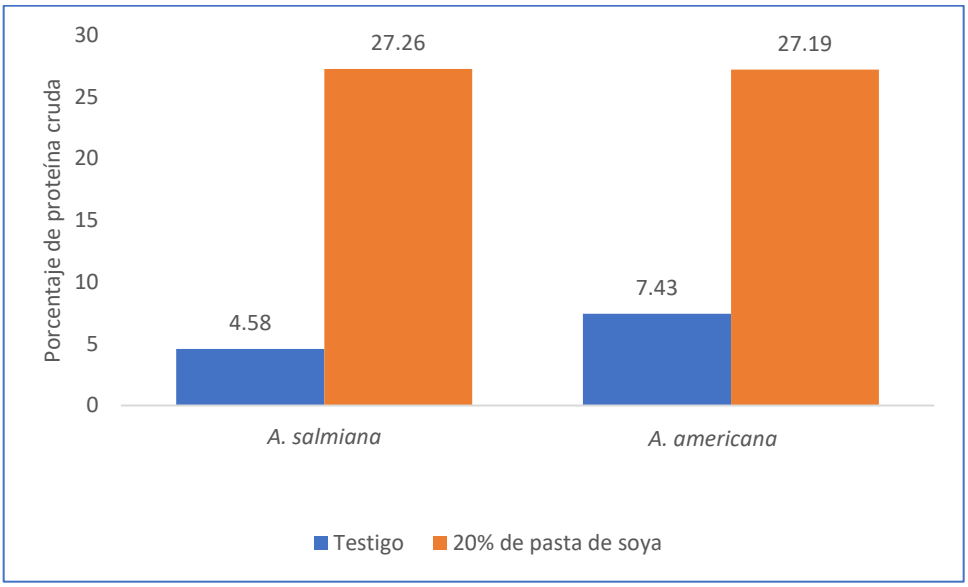


Figura 1. Incremento en el contenido de proteína cruda del ensilado de agave con la adición de pasta de soya.

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos en el análisis bromatológico sobre la caracterización química demuestran que la adición de pasta de soya al ensilado de agave, incrementa su valor nutritivo, el cual podría ser aprovechado para complementar la dieta en el ganado, especialmente rumiantes, en la época seca del año, ya la producción de agave no se ve afectado por la estacionalidad, como otros cultivos utilizados para ensilaje.

Se deben realizar pruebas de digestibilidad de la materia seca para tener una mayor certeza del nivel de aprovechamiento que tendrá este alimento por parte de los animales.

Es importante determinar los costos de producción de este alimento, ya que su uso estará determinado por el costo de la pasta de soya al momento de realizar el proceso de ensilaje y su disponibilidad en los mercados locales.

Se debe analizar la relación beneficio-costo del uso de pasta de soya respecto a otros ingredientes locales, como vainas y hojas de mezquite, para determinar la viabilidad de utilizar uno u otro como fuente proteínica en el ensilado de agave.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.O.A.C., “Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists”, Published by the Association of Official Agricultural Chemists, 1975, Washington, D.C.
2. A. J. García, “Los agaves de México” Ciencias 87. Jardín Botánico, Instituto de Biología, UNAM, julio-septiembre, 2007, pp. 14-23.
3. B. Wagner, V. Asencio y J. Caridad. “Como preparar un buen ensilaje”. Serie conservación de forrajes. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Centro de Producción Animal 2013. Santo Domingo, República Dominicana.

4. COMERCAM. “Informe estadístico 2024”. Tomado de https://comercam-dom.org.mx/estadisticas/. Consultado en línea el 24 de mayo de 2024.
5. CONAGUA. “Monitor de Sequía de México”. Tomado de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico. Consultado en línea el 13 de mayo de 2025.
6. CRT. Consejo Regulador del Tequila. “Datos estadísticos 2023”. Tomado de https://crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/. Consultado en línea el 24 de mayo de 2024.
7. D. L. Ortíz-Torres, M. Galván-Valencia, L. Delgadillo-Ruiz, J. Huerta-García, F. Cabral-Arellano, R. Bañuelos-Valenzuela, et al. Extracción y obtención de fracciones de saponinas a partir de hojas de los *Agaves salmiana* y *tequilana* weber de Zacatecas. XIII simposium-taller nacional y VI internacional “Producción y aprovechamiento de nopal y maguey”. Escobedo, Nuevo León. 2014: 170-182.
8. D. Solá-Oriol. “Harina de soya”. 3tres3.com, comunidad profesional porcina. Consultado en línea en https://www.3tres3.com/latam/articulos/harina-de-soja-44-48-pb_12159/ el 25 de mayo 2025.
9. E. García, “Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen”, serie Libros Num. 6, 1998, Instituto de Geografía, UNAM.
10. E. J. García-Herrera, S. J. Méndez-Gallegos, D. Talavera-Magaña. El género *Agave spp*. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. RESPyN :VIII Simposium-Taller Nacional y 1er Internacional “Producción y Aprovechamiento del Nopal” 2010: Ed Esp; 5:109-127.
11. E. Jiménez-Muñoz, F. Prieto-García, J. Prieto-Méndez, O. A. Acevedo-Sandoval, R. Rodríguez-Laguna. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencial en la obtención de pulpa de celulosa para la elaboración de papel. DYNA 2016; 83(197): 233-243.
12. FEDNA. “Tablas de la Fundación Española para la Nutrición Animal”. 2019. Consultado en línea el 15 de mayo de 2025. Disponible en: https://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/harina-de-soja-455-pb
13. F. N. C. Souza, T. C. Da Silva & C. V. D. M. Ribeiro. “Sisal silage addition to feedlot sheep diets as a water and forage source”. Animal Feed Science and Technology 2018; 235: 120-127.
14. G. Álvarez-Fuentes, J. C. García-López, J. M. Pinos-Rodríguez, Y. Jasso-Pineda, F. M. Tristán-Patiño, R. González-Garduño. “Maguey (*Agave spp*.) silage production with either alfalfa or mesquite pod meal as protein sources”. J. Anim. Plant Sci., Vol. 24, 1, 2015, pp. 3714-3721.
15. G. Nouel-Borges, J. Figueroa, P. Petit & Sánchez-Blanco R. “Preliminary evaluation of sisal (*Agave sisalana)* silage on total confinement lamb feeding”. Asian Journal of Animal Research 2013 1(1): 9-11.
16. G. S. González. Valor nutricional de dos Especies de Maguey, *Agave salmiana* y *Agave atrovirens* karw, forrajeras utilizadas en las zonas Áridas del Norte de México, en relación a sus características Fenológicas [tesis licenciatura]. Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN); 1994.
17. J. L. Montañez, J. C. Victoria, R. Flores, R. A. Vivar, “Fermentación de los fructanos de *Agave tequilana* Weber azul por *Zymomonas mobilis* y S*accharomyces cerevisiae* en la producción de bioetanol”, Inf. Tec., 2011; 22, 6, pp. 3-14.
18. J. Montañez-Soto, J. Venegas-González, M. Vivar-Vera, E. Ramos-Ramírez. Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber Azul. Bio, 2011; 23, 3, pp. 199-206.
19. J. M. Pinos, M. Zamudio y S. González. 2008a. The effect of plant age on the chemical composition of fresh and ensiled *Agave salmiana* leaves. S. Afr. J. Anim. Sci., Vol. 38 1, 2008a, pp. 43-50.
20. J. M. Pinos-Rodríguez, S. González-Muñoz, B. Badillo B, J. C. García-López, J. R. Aguirre-Rivera J. R. & S. Infante. Chemical composition and ruminal *in vitro* degradation of fresh or silage of *Agave salmina* Otto ex. Salm-Dick. J. Appl. Anim. Res., Vol. 33, 2008b, pp. 45-48.
21. M. A Mata-E, M. G. Torres-C, G. Hernández-I, M. A. Cobos-P, G. Rodríguez-S, A. Luevano-L, D. R. Guzmán-G, M. M. Gámez-A. Degradability *in vitro* of *Agave mapisaga*, *Agave salmiana* var. *salmiana* and *Agave salmiana* var. ferox. Rev. Chap. Ser. Zon. Arid., 2011; 10: 123-129.
22. M. A. Shimada MA (2018) “Alimentación animal”. Primera edición. Ed. Trillas SA de CV, México. 2018.

23. M. Garcés, R. Berrio, A. Ruiz, L. Serna y A. Builes. 2004. “Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado”. Revista Lasallista de Investigación Antioquia Colombia. 2004; 1(1):66-70
24. P. E. A. Silveira y F. R. Franco. “Conservación de forrajes: segunda parte”. Revista electrónica de veterinaria REDVET 2006. 7(11): 1-37. En http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n111106.html.
25. P. J. Partida, V. D. Braña, S. H. Jiménez, R. F. Ríos, G. Buendía. Producción de carne ovina. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Libro técnico No. 5. 2013.
26. S. Reyes-Castro, “Evaluación del potencial forrajero del ensilado de *Agave tequilana* weber cv. azul enriquecido con diferentes fuentes nitrogenadas”, [Tesis de doctorado], Posgrado de Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, 2022.
27. S. Reyes-Castro, M. Valencia-Posadas, D. A. Gutiérrez-Arenas, G. M. L. Ruiz-Aguilar, A. J. Gutérrez-Chávez, M. F. Isidrón-Pérez, H. G. Nuñez-Palenius, “Uso del ensilado de *Agave tequilana* weber cv. azul en la alimentación de ovinos en crecimiento”, Braz. J. Anim. Envirom. Res., 2022; Vol. 5, 2, pp. 2137-2148.
28. V. A. Gómez. Digestibilidad *in vitro* de dos variedades de maguey (*Agave salmiana* y *Agave americana*) [tesis de licenciatura]. Saltillo, Coahuila: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; 2003.

USO DE HERRAMIENTAS DE IA PARA OPTIMIZAR EL EXTRACTO DE SEMILLA DE ACEITE DE *Moringa Oleifera*: ELECTROCOAGULACIÓN MEJORADA PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS DEL AGUA

Alain S. Conejo-Dávila[1], Emili J. Nuñez-Mora[2], Blanca L. Martínez-Vargas[3], Patricio J. Espinoza-Montero[4], Locksley F. Castañeda[5], Ashantha Goonetilleke[6], Alain R. Picos-Benítez[3]*, Oscar M. Rodriguez-Narvaez[1*]

[1]Dirección de investigación y soluciones tecnológicas, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Calle Omega 201, León, Guanajuato, México, C.P. 37545. [2]Departamento de Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Tepic, Avenida Tecnológico #2595, Tepic, Nayarit, México. [3]Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No. 18, Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, Zac., 98160, México. [4]Escuela de Ciencias Químicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito 170525, Ecuador. [5]CONHACYT - Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Av. Juárez 77, Centro, 36000, Guanajuato, Guanajuato, México [6]Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Tecnológica de Queensland, GPO Box 2344, Brisbane 4001, Queensland, Australia
apicosb@ipn.mx, orodriguez@ciatec.mx

RESUMEN

La electrocoagulación se utiliza principalmente en el tratamiento de aguas residuales para eliminar contaminantes y compuestos indeseables mediante la sedimentación. Sin embargo, el proceso se basa en electrodos de aluminio y hierro y tiene altos requisitos de energía, lo que aumenta significativamente los costos de tratamiento. Estudios recientes han explorado el uso de extractos de aceite funcional de plantas con semillas como *Moringa oleifera*. No obstante, la incorporación de *extracto de M. oleifera* también puede aumentar los costos del proceso y complicar el control de parámetros clave. Por lo tanto, una metodología de optimización es esencial para minimizar los costos. En este estudio, se desarrolló un modelo de inteligencia artificial que utiliza redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos para predecir las condiciones operativas óptimas para el proceso destinado a mejorar la eliminación de Naranja Reactivo 84. El mejor modelo predictivo arrojó un error cuadrático medio del 6,16 % y un error porcentual absoluto medio del 4,60 %. Según lo confirmado por la validación experimental, los resultados obtenidos confirmaron la eficacia del modelo.

INTRODUCCIÓN

La electrocoagulación (EC) es una tecnología de tratamiento de agua no convencional que puede eliminar eficazmente los contaminantes a través de la sedimentación utilizando ánodos de aluminio y hierro. Ofrece varias ventajas sobre los métodos de coagulación tradicionales, incluida una alta eficiencia de eliminación y una menor producción de lodos. Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes, como los altos requisitos de energía. Para reducir el consumo de energía, los estudios anteriores se han centrado en mejorar la eficiencia de la electrocoagulación, particularmente mediante la incorporación de extractos de aceites esenciales de semillas que actúan de manera similar a los coagulantes y electrolitos químicos. Por ejemplo *Moringa oleifera* Se ha informado que el extracto (ME) es un compuesto eficaz para mejorar la eficiencia de eliminación en los procesos de coagulación. Esto se atribuye principalmente a la presencia de proteínas catiónicas con pesos moleculares que oscilan entre 6,5 y 48 kDa y puntos isoeléctricos entre 9 y 11. Estas propiedades permiten que el ME actúe como un polielectrolito con carga positiva, que ayuda a neutralizar la carga negativa de las partículas coloidales. Numerosos estudios han demostrado la eficacia de la *M. oleifera* en la eliminación de la materia suspendida de las aguas naturales. También ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de aguas residuales, como los efluentes producidos durante la extracción de aceite de palma y las aguas residuales domésticas, con una eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión que alcanza el 99% (Ver Tabla 1). De acuerdo con los estudios reportados, varias

variables deben ser manipuladas para lograr la eficiencia óptima de eliminación. Entre estas variables, *M. oleifera* La dosis del extracto, el tiempo de reacción y la concentración de contaminantes se encuentran entre los más importantes.

Tabla 1. Revisión de estudios previos que se centraron en la coagulación con *M. oleifera*.

Forma de *Moringa oleifera*	Fuente de aguas residuales	Resultados	Observaciones
Extracto crudo	Aguas residuales de molinos calientes	Eficiencia de eliminación del 98% utilizando extracto crudo de moringa	El pH es un factor no dependiente. Mayor volumen de producción de lodos
Extracto crudo	Aguas residuales de una industria petrolera	Una eficiencia media de eliminación del 82,43%	Los valores óptimos de pH oscilaron entre 4,0 y 9,5
Polvo de semillas	Recuperación de biomasa de microalgas a partir de un sistema de suspensión	Hasta el 97% de la recuperación de biomasa	El pH es un factor no dependiente. Mayor volumen de producción de lodos
Semillas de M. oleifera después de la extracción de aceite (también se utilizó el floculante NALCO 7751)	Efluente de molino de aceite de palma	Eficiencia de eliminación del 99%	El mejor rendimiento se alcanzó a pH 5, con un tiempo de sedimentación de 114 min y una concentración de *M. oleifera* de 3 469 mg. L-1, y 6 736 mg. $^{L-1}$ del floculante.
Semillas de M. oleifera después de la extracción de aceite	Agua potable	Hasta un 88% de eficiencia de eliminación	El pH es un factor no dependiente. Producción de alto volumen de lodos
Proteína aislada de M. oleifera	Agua turbia sintética y agua turbia real	Eficiencia de eliminación del 97% para cada tipo de agua	Se observó un ligero aumento en el valor del pH después de usar la proteína aislada.
Semillas de *M. oleifera* lam y *M. oleifera* trituradas después de la extracción de aceite	Agua natural de los ríos Monjas y San Pedro en Ecuador y efluentes reales de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales	Las mejoras medias en la calidad del agua fueron de 46,92 %, 63,21 % y 81,07 % para la demanda química de oxígeno, sólidos en suspensión y eliminación de patógenos, respectivamente.	No se observaron cambios significativos en la eficiencia de remoción a valores de pH entre 7.4 a 7.7

El uso de floculantes para mejorar la eficiencia de eliminación a menudo conduce a procesos que son más complejos y difíciles de manejar. Una solución prometedora para controlar las interacciones no lineales entre los parámetros asociados y optimizar el proceso es la aplicación de modelos de inteligencia artificial (IA), en particular los basados en redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmos genéticos (AG). Las RNA son modelos que imitan las redes neuronales biológicas que comparten algunas funciones, incluida la capacidad de aprender y extraer información. Estos modelos ofrecen varias ventajas sobre las metodologías de optimización tradicionales, como la identificación de métodos, y generalmente son más fáciles de calibrar en comparación con otros modelos de IA. Además, estos modelos de IA se pueden volver a aplicar para simular otros procesos específicos simplemente reentrenándolos con nuevos datos. Sin embargo, ANN también tiene varias limitaciones. Para superar sus limitaciones en la optimización, las RNA a menudo se combinan con otros modelos de IA, como un algoritmo genético. Estos modelos se basan en la teoría de la evolución de Darwin, según la cual solo los individuos más adaptados pueden reproducirse y generar nuevos miembros de su especie. Para el modelo ANN/GA, la solución global está representada por un organismo único que es el más adaptable de una población seleccionada con un código genético

excepcional. El modelo ANN/GA ha demostrado ser una herramienta de optimización eficaz al reducir significativamente los requisitos de datos de muestra en diversas aplicaciones, particularmente en el diseño, monitoreo, optimización y control de instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, los estudios anteriores se han centrado principalmente en optimizar y modelar los procesos de tratamiento de aguas residuales. El presente estudio utilizó un modelo ANN/GA para simular un proceso de electrocoagulación en el que *M. oleifera* se utilizó para mejorar la eficiencia de eliminación de la decoloración en aguas residuales sintéticas que contenían el colorante sintético, Naranja reactivo 84. Además, también se aplicó un modelo de AG para identificar las condiciones experimentales óptimas que pueden minimizar los requisitos de recursos o maximizar la eficiencia de eliminación de la decoloración del proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos

Los reactivos utilizados en el estudio fueron Naranja Reactiva 84 (RO84, marca Química-Mexifibras), NaCl, *semillas de M. oleifera* e hidróxido de sodio (NaOH, Macron). Todos los reactivos se utilizaron tal y como se recibieron.

Moringa oleífera extraction

El extracto de semilla de *Moringa oleifera* se obtuvo mediante un proceso de salazón previamente reportado por nuestro grupo de investigación (Laney et al., 2020). Se añadieron 22,4 y 2 g de sal de NaCl y semillas de *Moringa oleifera* (MO) a 450 mL de agua destilada, respectivamente. La solución se mezcló durante 30 minutos y se filtró con papel de filtro de Rochline Industries. Finalmente, el filtrado obtenido se filtró al vacío utilizando un filtro de tamaño de poro de 15 µm.

Experimentos de eliminación de tinte

Para los experimentos de eliminación de colorante, se añadió una solución madre de 600 mL de 100 mg de solución de colorante L^{-1} Reactive Orange 84 (RO84) a 1 L de conos Imhoff. Se introdujeron electrodos de hierro (Fe) y aluminio (Al) con un área de 103,2 cm2 en el reactor utilizando diferentes configuraciones de cátodo y ánodo (Fe/Fe, Fe/Al, Al/Fe y Al/Al). Los electrodos se conectaron a una fuente de alimentación y se aplicaron diferentes densidades de corriente (1320 y 3620 mA cm^{-2}). Los experimentos se realizaron durante 12 min, y se tomó una muestra de 4 mL cada 3 min. Las muestras se filtraron utilizando filtros de jeringa de 0,45 µm y 0,22 µm y se analizaron a una longitud de onda de 494 nm en un espectrofotómetro Jenway modelo 6705.

Modelo de inteligencia artificial

Redes neuronales artificiales (RNA)

La aplicación de la RNA se ejecuta en 5 etapas: i) recolección de datos, ii) diseño de ANN, iii) capacitación, iv) validación y v) aplicación. Dada la ausencia de una metodología establecida para el desarrollo del modelo, fue crucial seleccionar la arquitectura de la RNA a través de un enfoque de prueba y error. El tipo de electrodo, *M. oleifera* La concentración del extracto, la densidad de corriente y la concentración de colorante se eligieron como variables de entrada, mientras que la eficacia de la eliminación de la decoloración se designó como variable de respuesta. Se evaluaron múltiples arquitecturas ANN por ensayo y error para encontrar el modelo con el error mínimo, que se estableció en 0,005. Las funciones de transferencia logarítmico-sigmoide se seleccionaron en las capas ocultas, ya que combinan eficazmente el comportamiento curvilíneo, cuasilineal y constante. Se seleccionó el algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt (LM-BP) para identificar relaciones no lineales entre las variables de entrada y salida. Se recogieron un total de 57 conjuntos de datos experimentales. De estos datos, el 70% se utilizó para entrenar la ANN, el 20% para las pruebas y el 10% restante para la validación del modelo. Para identificar la mejor RNA, se utilizaron el error

cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) (Ec. 1 y Ec. 2, respectivamente).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{t_i} - \mathrm{td_i})^2} \quad (1)$$

$$\mathrm{MAPE} = \frac{1}{\mathrm{N}}\left[\sum_{\mathrm{i}=1}^{1}\left|\frac{\mathrm{t_i} - \mathrm{td_i}}{\mathrm{t_i}}\right|\right] * 100 \quad (2)$$

Dónde:

t_i: es el valor real

td_i: el valor predicho por la RNA

n y *N*: el número de datos de prueba

Algoritmo genético (AG)

En este estudio, cada individuo tenía un código genético único que representaba las diversas condiciones experimentales probadas (Tipo de electrodo, *M. oleifera* concentración del extracto, densidad de corriente, concentración de tinte y eficiencia de eliminación de la decoloración). Este grupo de individuos fue identificado para generar el vector de entrada. La función de aptitud evalúa todas las soluciones posibles y genera una población aleatoria inicial. Para las generaciones subsiguientes, el GA aplica tres reglas: i) selección de los mejores individuos, ii) probabilidades de cruzamiento y iii) reglas de mutación (cambios aleatorios en el código genético de un individuo aleatorio). Los datos experimentales obtenidos determinaron los límites superior e inferior de las variables de entrada. De manera similar al enfoque adoptado para modelar la ANN, no se ha definido una metodología estandarizada para seleccionar los parámetros iniciales de la AG. Por lo tanto, la selección de los valores de los parámetros iniciales para el AG se definió por ensayo y error. Los valores seleccionados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del algoritmo genético.

Parámetro	Valor
Número de variables	4
Tamaño inicial de la población	20
Probabilidad de cruce	0.8
Recuento de élite	2
Niños	2
Tipo de cruce	Disperso
Probabilidad de mutación	0.2
Límites inferiores (TE, ME, CD y DC)	I, 0,01, 1310, 1,443
Límites superiores (TE, ME, CD y DC)	Al, 25, 3620, 0.866

Caracterización de extractos

La cuantificación de los fenoles totales extraídos se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Singleton et al. (1999). Se desarrolló la curva de calibración (Sigma-Aldrich, Shanghai, China) (0-400 mg L^{-1}) a una longitud de onda de 760 nm (Biotek Synergy HT, Hampton, NH, USA). Los resultados se expresaron en µmol Trolox Equivalent (ET) de mL de extracto de MO (µmol ET mL^{-1} extracto). La capacidad antioxidante del radical 2,20-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) se determinó utilizando el método presentado por Brand-Williams et al. (1995) con una curva de calibración (0-100 mg L^{-1}) a una longitud de onda de 517 nm (Biotek Synergy HT, EE.UU.). Los

resultados se expresaron en µmol ET de mL de extracto de MO (µmol ET mL^{-1} de extracto). La capacidad antioxidante de la 2,20-Azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfonato (ABTS) se determinó utilizando el método establecido por Re et al. (1999) a una longitud de onda de 734 nm (Biotek Synergy HT, USA), con una curva de calibración (0-150 mg L^{-1}). Los resultados se expresaron en µmol ET de mL de extracto de MO (µmol ET mL^{-1} de extracto). La capacidad antioxidante reductora de hierro (FRAP) se midió a una absorbancia de 700 nm (Biotek Synergy HT, EE. UU.). La capacidad reductora se determinó mediante una curva de calibración con ácido ascórbico (0-30 mg L^{-1}). Los resultados se expresaron como µmol ET de mL de extracto de MO (µmol ET mL^{-1} de extracto).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización del extracto de Moringa oleífera

Se ha informado que los extractos naturales como el extracto de semilla de MO tienen una cantidad significativa de biomoléculas (por ejemplo, proteínas, polisacáridos, lípidos y ácidos nucleicos) que pueden actuar como coagulantes para la eliminación de contaminantes del agua. De los diferentes extractos naturales, se destacan los extractos de MO porque, dependiendo del proceso de extracción (por ejemplo, salado), proporcionan un polielectrolito de 3000 Da, lo que aumenta la conductividad y mejora la reacción redox y, por tanto, el proceso de electrocoagulación.

En la Tabla 3 se muestra la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos del extracto de semilla de MO. Los compuestos fenólicos totales se encontraron en dosis relativamente más bajas en comparación con los compuestos antioxidantes ABTS y DPPH, lo que indica que las reacciones redox pueden producir radicales libres, que podrían reaccionar con diferentes moléculas orgánicas para modificar su solubilidad. Esto aumenta su peso molecular y, en algunos casos, favorece la fragmentación de las moléculas orgánicas.

Tabla 3. Caracterización del extracto de *M. oleífera* .

Fenoles solubles totales, mg EAG mL^{-1}	ABTS, µmol ET mL de extracto-1	DPPH, µmol ET mL de extracto-1	FRAP µmol ET mL de extracto-1
3,52 ± 1,11	145,61 ± 6,02	121,27 ± 15,81	0.177 0.106

Electrocoagulación acoplada a experimentos de extracto de MO.

La Fig. 1 muestra los resultados de las pruebas experimentales para diferentes configuraciones de ánodos y cátodos (Fe/Al, Al/Al, Al/Fe y Fe/Fe) y para dos densidades de corriente diferentes (1320 y 3620 mA cm^{-2}) con y sin extracto de MO después de 3 y 12 min de tiempo de reacción para la eliminación de Reactive Orange 84. De los resultados experimentales se desprende que cuando el MO está presente, el porcentaje de remoción aumenta por encima del 90% para casi todas las condiciones investigadas, excepto el tiempo de reacción de 3 min con 12,5 mL de extracto de MO y utilizando las configuraciones de electrodos Fe/Al y Fe/Fe y para el tiempo de reacción de 3 min con 25 mL de extracto de MO utilizando la configuración de electrodos de Al/Al.

En el proceso de electrocoagulación sin el extracto de MO, en la mayoría de las condiciones investigadas a los 3 min, los porcentajes de remoción estuvieron por debajo del 90% excepto para la configuración de electrodos de Fe/Fe con 12,5 mL de extracto sin MO a 1320 mA cm^{-2} y 25 mL de extracto sin MO a 1320 y 3620 mA cm^{-2}. Sin embargo, a los 12 minutos, la mayoría de los experimentos con y sin MO alcanzaron una eficiencia de remoción del 90% o más. El aumento de la eficiencia utilizando el extracto de MO se correlacionó con los diferentes compuestos presentes, que tienen otras funciones en el proceso de electrocoagulación. Por ejemplo, los compuestos antioxidantes (ABTS y DPPH) producen rápidamente radicales libres estables que reaccionan con un colorante orgánico, aumentando su hidrofobicidad y peso molecular y produciendo moléculas de agua inmiscibles que floculan o precipitan en función de su densidad. Los compuestos fenólicos, al

ser estructuras aromáticas, actúan como contaminantes orgánicos del agua, siendo fácilmente eliminados por electrocoagulación u oxidados por radicales libres ABTS. Además, la concentración de ABTS es mucho mayor en comparación con los compuestos fenólicos obtenidos del extracto de MO. Por cierto, estas moléculas aromáticas no afectaron el proceso de eliminación del tinte. Todas las especies orgánicas que reaccionan con diferentes mecanismos actúan sinérgicamente para mejorar la eficiencia de la eliminación del tinte.

Aunque la Fig. 1 ilustra cómo el extracto de MO mejora la eliminación de contaminantes para diferentes parámetros como la concentración de extracto de MO, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, no es una guía confiable para determinar las mejores condiciones experimentales porque no se pueden detectar variaciones sutiles entre las diferentes condiciones experimentales. En consecuencia, era necesario aplicar un método de inteligencia artificial para determinar las condiciones óptimas del proceso.

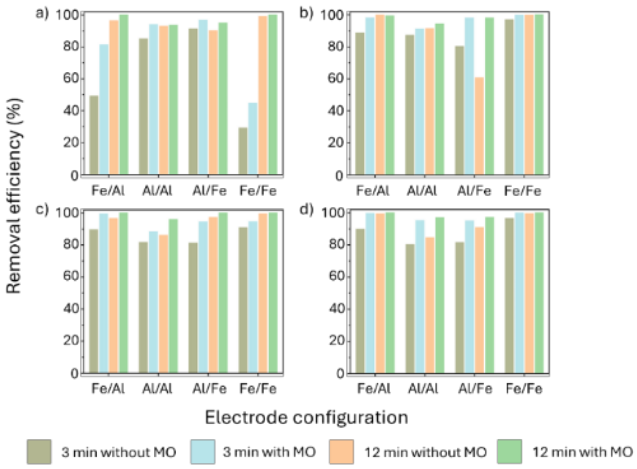


Figura 1. Comparación de la remoción de naranja reactivo 84 utilizando diferentes configuraciones de electrodos con y sin MO para diferentes períodos (3 y 12 min) y diferentes densidades de corriente (1320 y 3620 mA cm^{-2}): a) 12.5 mL de MO a 1320 mA cm^{-2}; b) 12.5 mL de MO a 3620 mA cm^{-2}; c) 25 mL de MO a 1320 mA cm^{-2}; d) 25 mL de MO a 3620 mA cm^{-2}.

Aplicación de modelos de inteligencia artificial

Recogida de datos experimentales.

Este estudio utilizó cuatro variables como entradas para el modelo ANN (material del electrodo, concentración de extracto de *M. oleifera* , densidad de corriente y concentración de colorante) y una variable de salida (eficiencia de remoción de colorante). Todos los parámetros fueron variados aleatoriamente para la recolección de datos experimentales. En total, se realizaron 57 experimentos y los resultados se seleccionaron para entrenar a la RNA. Se midió la eficiencia de eliminación de la decoloración y los resultados se muestran en la Fig. 2.

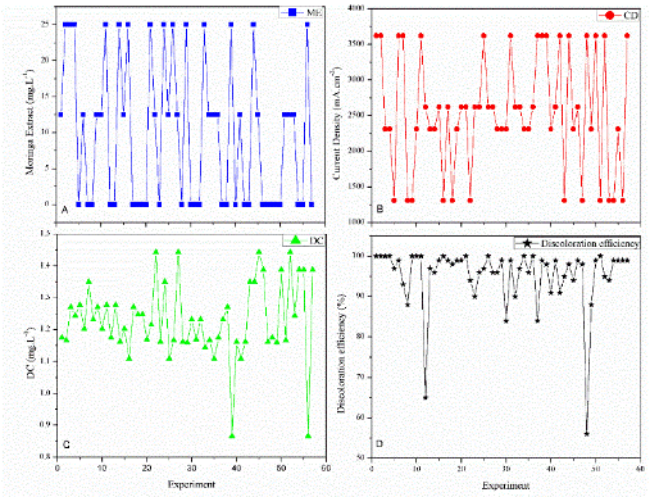


Figura 2. Recopilación de datos experimentales para el entrenamiento de ANN: A) concentración de extracto de MO, B) densidad de corriente, C) concentración de colorante y D) eficiencia de eliminación de colorante.

Se puede ver en la Fig. 2 que no existe una relación directa entre las variables de entrada utilizadas y la eficiencia de eliminación. Según los resultados, la eficiencia de eliminación de la decoloración estuvo entre el 56 y el 99%. Por lo tanto, comprender las interacciones no lineales entre las variables de entrada y salida requiere investigaciones extensas y que requieren mucho tiempo. De acuerdo con una revisión de la literatura, ningún estudio previo ha reportado las condiciones experimentales necesarias para lograr las máximas eficiencias de remoción con bajos requerimientos de recursos para optimizar el proceso de electrocoagulación asistido por el extracto de MO. Se planteó la hipótesis de que los modelos de inteligencia artificial (IA) pueden ayudar en esta tarea.

Modelo ANN

Después de la recolección de datos experimentales, la arquitectura de la RNA se definió mediante ensayo y error hasta que la diferencia entre los datos experimentales y los datos predichos por el modelo fue mínima. La ANN fue diseñada para permitirle descubrir una relación entre las variables de entrada y salida modificadas. La mejor arquitectura de RNA fue una retropropagación con neuronas 4-10-7-1 y funciones de transferencia logarítmico-sigmoide (Fig. 3).

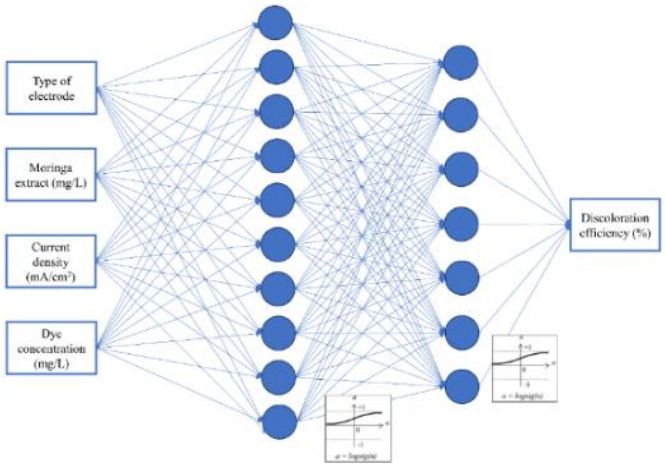


Figura 3. Arquitectura ANN.

Después de obtener una RNA aceptable, se evaluó su rendimiento mediante MAPE y RMSE. Para la arquitectura ANN seleccionada (Fig. 3), los valores de MAPE y de error cuadrático medio obtenidos fueron 4,603% y 6,160 %, respectivamente.

Con fines de optimización, algunos investigadores han informado sobre el uso del diseño de experimentos para modelar y predecir las mejores condiciones operativas para procesos de oxidación avanzada (AOP). Este método de optimización de un factor a la vez es apropiado para estudios en los que es necesario comprender todas las interacciones entre las variables de entrada y salida. Sin embargo, cuando se utiliza ANN para el modelado, no es necesario un conocimiento y una comprensión profundos del proceso y de las interacciones de todos los parámetros involucrados. En cambio, proporciona conocimiento sobre la interacción de algunos factores y proporciona información confiable que se puede utilizar para predecir el comportamiento del proceso investigado.

Optimización de la electrocoagulación con AG

ANN es un modelo de IA que puede emular el comportamiento del proceso de electrocoagulación después de un entrenamiento adecuado y la selección adecuada de su arquitectura. Sin embargo, para evitar que las RNA quedaran atrapadas en mínimos locales, se utilizó un modelo basado en AG. El objetivo principal del modelo ANN/GA fue encontrar una combinación de condiciones operativas en las que el proceso de electrocoagulación pueda alcanzar la máxima eficiencia de eliminación de la decoloración con un uso de energía relativamente bajo, un bajo consumo de productos químicos, un bajo consumo de tiempo y utilizando el tipo de electrodo más económico.

En la Tabla 4 se enumeran las posibles soluciones proporcionadas por el modelo ANN/GA. Los parámetros se clasificaron en dos grupos. Los valores se sometieron a un análisis de intervalos de confianza para simplificar la selección de las mejores combinaciones.

Tabla 4. Posibles mejores condiciones operativas para el proceso de electrocoagulación investigado.

Grupo	Tipo de electrodo		Concentración de extracto de moringa, mL de extracto por 100 mL de solución	Densidad de corriente, mA cm^{-2}	Concentración de colorante mg L^{-1}	Eficiencia de decoloración, %
1	Al	Al	25	3536	1.24	99
2	Fe	Al	12.5	3485	1.20	99

En la Tabla 4 se muestra un claro ejemplo de solución local y global. Ambas soluciones dadas por el modelo de IA predicen una eficiencia de eliminación de la decoloración del 99%. Las condiciones experimentales propuestas para el Grupo 2 dan el mismo porcentaje de eliminación de contaminantes con hierro que un ánodo de sacrificio, necesitando un extracto de MO relativamente bajo y una densidad de corriente baja, lo que permite una concentración de colorante similar. Por esta razón, se seleccionaron las condiciones operacionales del Grupo 2 para la validación experimental del modelo. El criterio de selección fue la capacidad de eliminar altas concentraciones de colorantes sintéticos a niveles aceptables con los menores requerimientos de recursos. El estudio actual proporciona información fiable sobre la utilización de un modelo de IA para mejorar el proceso de electrocoagulación. El modelo sugiere que el proceso funciona de manera óptima cuando se controlan ciertas variables. Si bien algunas condiciones experimentales, como la concentración de colorante, son difíciles de controlar en un sistema de tratamiento de aguas residuales real, la selección de otras condiciones se puede manejar fácilmente. Por lo tanto, la combinación de condiciones experimentales se basa en aquellas que se pueden controlar para obtener una alta eficiencia de eliminación de la decoloración. En la Tabla 5 y la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos utilizando las condiciones experimentales recomendadas por el modelo de IA. Se logró una eficiencia de eliminación de decoloración de 98.8% ± 0.85 utilizando los valores propuestos por

el modelo. El error entre las dos configuraciones experimentales fue inferior al 1%, lo que demuestra que el modelo optimizó sistemáticamente el proceso.

Tabla 5. Evaluación experimental del modelo ANN/GA.

Grupo	Tipo de electrodo		Concentración de extracto de moringa, mL de extracto por 100 mL de solución	Densidad de corriente, mA cm^{-2}	Concentración de colorante mg L^{-1}	Predijo eficiencia de decoloración, %	Eficiencia real de decoloración, %
1	Al	Al	25	3536	1.24	99	98.2
2	Fe	Al	12.5	3485	1.20	99	99.4

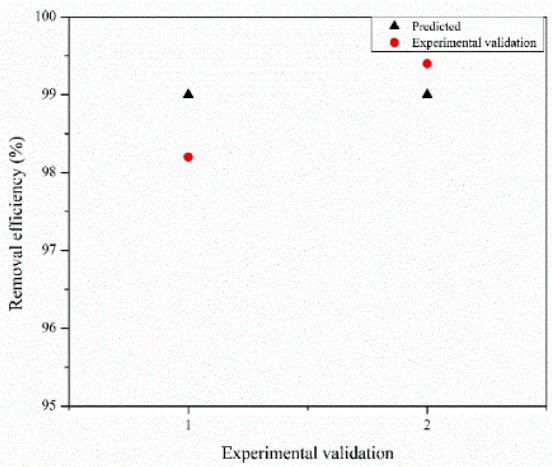


Figura 4. Comparación de los valores previstos de eficiencia de remoción de tinte del modelo ANN/GA y las corridas experimentales utilizando las mismas condiciones.

Este estudio confirma la eficacia de un modelo ANN/GA en la optimización del proceso de electrocoagulación para la eliminación de colorantes. El proceso de electrocoagulación se mejoró con *extracto de Moringa oleifera* para mejorar la eliminación del contaminante.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- MO mejora la eliminación de tinte en el proceso de electrocoagulación. Esto se debe a la secuencia de diferentes reacciones entre las moléculas presentes en el extracto y el colorante orgánico, que actúan de forma sinérgica.
- El modelo ANN/GA predijo las mejores condiciones operativas para el proceso de electrocoagulación utilizando extracto de MO. El modelo proporciona un conjunto de condiciones experimentales que proporcionaron la mayor eficiencia de eliminación de la decoloración, lo que demuestra su eficacia para optimizar los parámetros operativos.
- Un modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales artificiales (ANN) y algoritmos genéticos (GA) se ajusta eficazmente a los datos experimentales de procesos electroquímicos individuales y acoplados, lo que resulta en menos ejecuciones experimentales. Esto demuestra la eficacia del modelo de IA.

BIBLIOGRAFIAS

Castañeda, L. F., Coreño, O., & Nava, J. L. (2019). Eliminación de arsénico y sílice hidratada de aguas subterráneas mediante electrocoagulación utilizando un reactor de flujo ascendente en un conjunto de serpentinas. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7, 103353. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103353

Castañeda, L. F., Coreño, O., Nava, J. L., & Carreño, G. (2020). Eliminación de fluoruro y sílice hidratada de aguas subterráneas por electrocoagulación en un reactor de canal de flujo. Chemosphere, 244, 125417. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125417

Chouhan, A., Thakur, L. S., Patidar, K., & Varma, A. K. (2018). Una revisión sobre la eliminación de metales pesados del agua/aguas residuales mediante un proceso de electrocoagulación. International Research Journal of Engineering and Technology, 5(5), 934–944. http://www.irjet.net

Apshankar, K. R., & Goel, S. (2018). Revisión y análisis de la defluoración del agua potable por electrocoagulación. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 67(3), 297–316. https://doi.org/10.2166/aqua.2018.113

Agarwal, H., & Shanmugam, V. K. (2019). Síntesis y optimización de nanopartículas de óxido de zinc utilizando Kalanchoe pinnata hacia la evaluación de su actividad antiinflamatoria. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 54, 101291. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101291

Laney, B., Rodríguez-Narváez, O. M., Apambire, B., & Bandala, E. R. (2020). Defluoración del agua utilizando extracto de semilla de Moringa oleifera acoplado secuencialmente y electrocoagulación. Groundwater Monitoring & Remediation, 40(1), 67–74. https://doi.org/10.1111/gwmr.12396

Alghamdi, A., Rajan, K. P., & Thomas, S. P. (2024). Evaluación integral de la semilla de Moringa oleifera como adsorbente de bajo costo para la eliminación de manganeso (Mn) de soluciones acuosas. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9, 100635. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100635

Iqbal, Y., Ahmed, S., Aziz, M. H., Alam, M., Asif, M., & Huang, Q. (2024). Enfoque más verde para la síntesis de la nanoestructura de ZnO-CeO2 decorada con Ag utilizando Moringa oleifera LE y su investigación como fotocatalizador para la degradación de ciprofloxacina y naranja de metileno. Materials Chemistry and Physics, 318, 129299. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129299

Ndinda, C., Njenga, M., & Kozyatnyk, I. (2024). Exploración de biochar y proteínas de semillas de Moringa oleifera para la remediación de aguas grises en pequeñas granjas. Bioresource Technology, 405, 130935. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130935

Trigueros, D. E. G., Hinterholz, C. L., Fagundes-Klen, M. R., Veit, M. T., & Formentini-Schmitt, D. M. (2023). Evaluación estadística del proceso de coagulación-floculación mediante el uso de extracto de semillas de Moringa oleifera para reducir la turbidez de las aguas residuales de la industria láctea. Bioresource Technology Reports, 23, 101579. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101579

Lester-Card, E., Smith, G., Lloyd, G., & Tizaoui, C. (2023). Un enfoque verde para el tratamiento de aguas residuales aceitosas de acerías utilizando coagulante natural de semillas de Moringa oleifera. Bioresource Technology Reports, 22, 101393. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101393

Magalhães, E. R. B., Fonseca de Menezes, N. N., Silva, F. L., Alves Garrido, J. W., Bezerra Sousa, M. A. dos S., & dos Santos, E. S. (2021). Efecto de la extracción de aceite en la composición,

estructura y efecto coagulante de las semillas de Moringa oleifera. Journal of Cleaner Production, 279, 123902. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123902

Abdul Hamid, S. H., Hamid, A., Lananan, F., Khatoon, H., Jusoh, A., & Endut, A. (2016). Un estudio de la proteína coagulante de Moringa oleifera en la biofloculación de microalgas. International Biodeterioration & Biodegradation, 113, 310–317. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.027

Bhatia, S., Othman, Z., & Ahmad, A. L. (2007). Coagulación: proceso de floculación para el tratamiento de POME con extracto de semillas de Moringa oleifera: estudios de optimización. Chemical Engineering Journal, 133, 205–212. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.034

García-Fayos, B., Arnal, J. M., Sancho, M., & Rodrigo, I. (2016). Moringa oleifera para el tratamiento de agua potable: influencia del disolvente y método utilizado en la extracción de aceite en la eficiencia coagulante del extracto de semilla. Desalination and Water Treatment, 57, 23397–23404. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1137144

Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H., & Dalhammar, G. (2005). Una comparación del rendimiento de la semilla de Moringa oleifera y una proteína coagulante purificada para la clarificación del agua. Water Research, 39, 2338–2344. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.012

Folkard, G. K., Sutherland, J. P., & Alayade, A. (2000). Control de la turbidez en agua potable mediante semilla de Moringa oleifera de cultivo local. Waterlines, 18(2), 30–32. https://doi.org/10.3362/0262-8104.2000.013

Adama, O., Banda, E., Folkard, G., & Sutherland, J. (2000). Uso de semillas de Moringa oleifera para el tratamiento del agua en las comunidades rurales de Malawi. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 49(2), 141–153.

Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Coagulación para la eliminación de algas con extractos de semilla de Moringa oleifera. Water Research, 35(15), 3758–3762. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00103-5

Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., & O'Neill, J. G. (2010). Una revisión de la eficacia del uso de Moringa oleifera para el tratamiento del agua potable. Natural Resources Forum, 34(1), 27–33. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2010.01328.x

Katayon, S., Megat Mohd Noor, M. J., Asma, M., Ghani, L. A. A., Thamer, A. M., Azni, I., Ahmad, J., & Khor, B. C. (2006). Moringa oleifera semilla como coagulante natural en el tratamiento del agua. Desalination, 174(1), 217–236. https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.012

Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A., & Zimmerman, J. B. (2008). Composición y propiedades de la proteína coagulante de Moringa oleifera Lam. Applied and Environmental Microbiology, 74(15), 4577–4585. https://doi.org/10.1128/AEM.00301-08

Jahn, S. A. A. (1986). Propiedades adecuadas de las semillas de Moringa oleifera para el uso de coagulante en el tratamiento del agua. Water Science and Technology, 19(5–6), 493–500. https://doi.org/10.2166/wst.1987.0171

Jahn, S. A. A. (1988). Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. GTZ.

Gassenschmidt, U., Jany, K. D., Tauscher, B., & Niebergall, H. (1995). Un coagulante natural para la clarificación del agua. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 44(1), 5–10.

Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. S. (1996). Eliminación de turbidez en aguas turbias utilizando semilla de Moringa oleifera. Water Research, 29(2), 703–710. https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y

Muyibi, S. A., & Evison, L. M. (1995). Optimización del método de extracción de coagulantes de Moringa oleifera semillas y aplicación a aguas con diferente turbidez. Water Research, 29(12), 2689–2695. https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00129-7

Ghebremichael, K. A. (2004). Moringa seed and pumice as alternative natural materials for drinking water treatment [Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology]. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-3132

Do, Q. D., Angkawijaya, A. E., Tran-Nguyen, P. L., Huynh, L. H., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., & Ju, Y. H. (2014). Técnicas de extracción de compuestos fenólicos de materiales vegetales: una revisión. Journal of Chromatography A, 1370, 2–17. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.09.008

Sánchez-Gutiérrez, M., Borrás-Enríquez, D., & Zamora-Ledezma, E. (2022). Extracción de proteínas: métodos y aplicaciones en el tratamiento de aguas. Revista de Ciencias Ambientales, 56(1), 87–98. https://doi.org/10.15359/rca.56-1.6

Thirugnanasambandham, K., & Sivakumar, V. (2015). Optimización del proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de aguas residuales utilizando extracto de semillas de Moringa oleifera: una aplicación de superficie de respuesta. Journal of Environmental Chemical Engineering, 3(2), 1030–1040. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.03.008

Fahey, J. W. (2005). Moringa oleifera: Una revisión de las propiedades medicinales y usos. Trees for Life Journal, 1(5), 1–15. https://www.tfljournal.org/article.php/20051201124931586

Ali, E. N., Muyibi, S. A., Salleh, H. M., & Alam, M. Z. (2010). Eficiencia de las semillas de Moringa oleifera como coagulante natural para la eliminación de aceite, turbidez y sólidos suspendidos en aguas residuales industriales. Environmental Engineering Research, 15(2), 125–134. https://doi.org/10.4491/eer.2010.15.2.125

Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Water use and sanitation. Our World in Data. https://ourworldindata.org/water-access

World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950

FOTOCATÁLISIS CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2) COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE VINAZAS TEQUILERAS: EVALUACIÓN DE SU VIABILIDAD Y EFICIENCIA

Joel de Jesús Barba Franco[1 y 2], Edgardo Martínez-Orozco[1], Laura Izascum Pérez Valencia[1], Norberto Santiago Olivares[1], Efrén González Aguiñaga[3] y Cesar S. Magaña Martinez[1]

[1]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas, Avenida José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México, [2]Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, Enrique Díaz de León 1144, 47463, Lagos de Moreno, Jalisco, Mexico, [3]Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad León. UNAM, 37689, León, Guanajuato, México.
jbarba151292@gmail.com

RESUMEN

La industria tequilera es un sector clave en la economía y cultura de México, alcanzó una producción anual de 524.5 millones de litros promedio en los últimos 5 años. Sin embargo, su impacto ambiental es significativo debido a la generación de grandes volúmenes de vinazas, un residuo líquido con alta carga orgánica y mineral. Se estima que por cada litro de tequila producido se generan entre 10 y 12 litros de vinazas, lo que representa aproximadamente 5300 millones de litros anuales en México. Para mitigar su efecto contaminante, se han explorado diversas estrategias de tratamiento, incluyendo digestión anaeróbica, evaporación en estanques y tecnologías avanzadas como la oxidación electroquímica y la filtración con membranas. No obstante, estos métodos presentan limitaciones en términos de eficiencia, costos y viabilidad operativa. La fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2) se ha propuesto como una alternativa innovadora para el tratamiento de aguas residuales industriales. Este proceso, basado en la activación del TiO_2 mediante radiación UV o solar, genera especies reactivas de oxígeno capaces de degradar compuestos orgánicos y reducir la carga contaminante sin generar subproductos peligrosos.

En este estudio, se evaluó la viabilidad de la fotocatálisis con TiO_2 para el tratamiento de vinazas tequileras. Se obtuvieron muestras de vinaza de una tequilera en Arandas, Jalisco, las cuales fueron filtradas con papel filtro con poro de 20 micras. Posteriormente, se prepararon soluciones al 5% de vinaza en matraces Erlenmeyer de 100 mL y se les añadió TiO_2 en concentraciones de 1 mg/mL y 5 mg/mL. Las muestras fueron sometidas a agitación orbital a 150 rpm bajo luz solar. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos clave al inicio del experimento y después de 24 horas, incluyendo sólidos totales (ST), sólidos sedimentables/suspendidos (SST), sólidos disueltos/solubles totales, turbidez, pH, conductividad eléctrica. Los resultados mostraron reducciones de 52% y 86% en los ST, mientras que la turbidez disminuyó en un 64% y 82% y una disminución del 16% y 18% en la conductividad eléctrica para las concentraciones de 1 mg/mL y 5 mg/mL, respectivamente. Asimismo, se observaron reducciones del 95% en los SST para ambas concentraciones después de 24 horas de tratamiento. Estos hallazgos indican un efecto fotocatalítico prometedor del TiO_2 en la remoción de contaminantes de las vinazas tequileras. Si bien la fotocatálisis con TiO_2 demostró ser efectiva en la reducción de parámetros importantes como ST, conductividad eléctrica, es necesario profundizar en la optimización del proceso, considerando variables como el tiempo de exposición, la intensidad lumínica y la reutilización del catalizador. Además, se requiere evaluar su escalabilidad y viabilidad económica, para aplicaciones a nivel industrial.

INTRODUCCIÓN

Las vinazas son conocidas como un residuo nocivo líquido resultado de la industria del licor, su origen se da en las etapas de destilación y fermentación [1]. Las principales características de este residuo son su alto contenido de materia orgánica, pH ácido (3.4 y 4.5) y presencia de compuestos como alcoholes, ácidos orgánicos y sólidos suspendidos, lo que lo convierte en un efluente con un significativo potencial contaminante [2]. En México, la industria tequilera es una actividad de gran importancia como bebida emblemática, tan solo en 2024 la producción de tequila alcanzó los 524.5

millones de litros [3], pero derivado de esta industria se generan una gran cantidad de residuos, estima que por cada litro de tequila producido se generan entre 10 y 12 litros de vinazas, lo que representa un volumen anual aproximado de 1.8 billiones de litros en México, principal país productor de tequila [4].

El impacto ambiental de las vinazas es considerable, ya que presenta un elevado nivel de contaminación debido a su alta concentración de materia orgánica, y según la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021, no cumple con los estándares ambientales requeridos para ser vertido directamente, sin realizar tratamiento adecuado puede contaminar suelos, cuerpos de agua, derivando a corto plazo daños a la biodiversidad. Químicamente su alta demanda de oxígeno (DQO) y la presencia de compuestos tóxicos pueden provocar eutrofización en ríos y lagos, así como la alteración de los ciclos biogeoquímicos en los suelos [5]. Además, su pH ácido puede llegar a corroer infraestructura y afectar la calidad del agua para consumo humano y agrícola.

Por esta razón, se han sugerido diversos métodos para tratar las vinazas y aprovecharlas en la elaboración de nuevos productos [6]. Un ejemplo es el uso de procesos biológicos, como la digestión anaeróbica, que permite la degradación de la materia orgánica y la generación de biogás como subproducto energético [7]. Otro método es la evaporación en estanques, aunque este enfoque puede generar olores desagradables y no elimina completamente los contaminantes. También se han explorado técnicas avanzadas como la oxidación electroquímica y la filtración con membranas, que ofrecen una remoción más eficiente de contaminantes pero con mayores costos operativos [8]. Sin embargo, aunque se tengan una gran cantidad de procesos de tratamiento y reutilización, las vinazas de la industria del tequila, siguen siendo un desafío ambiental significativo debido a sus altos volúmenes de producción. Sin embargo, se siguen investigando métodos de tratamiento adecuados. Es por esto que el objetivo central de este trabajo es evaluar el tratamiento de vinaza de tequila mediante un proceso fotocatalítico que incluye el compuesto dióxido de titanio (TiO2).

TEORÍA

En la rama de tratamiento de aguas, existen y han surgido varios métodos para llevar a cabo el mejoramiento de aguas contaminadas, uno de estos métodos más relevantes que han sido probados y utilizados en la eliminación de contaminantes tóxicos presentes en aguas residuales es la fotocatálisis heterogénea. La fotocatálisis constituye un método de oxidación avanzada, este método se caracteriza por la intensificación de una reacción fotoquímica gracias a la acción de un catalizador. Dicho catalizador, al excitarse por la absorción de luz, incrementa la velocidad de la reacción y reacciona con los contaminantes, ya sea a través de un estado activado (C) o por la generación de pares electrón-hueco [9]. Los electrones activados se transfieren a la especie susceptible de reducción, mientras que el catalizador recibe electrones de la especie oxidable, los cuales llenan los huecos (e^-/h^+). Como resultado, el balance neto de electrones se mantiene equilibrado, preservando la integridad del catalizador. Este proceso desencadena reacciones redox que conducen a la degradación y mineralización del compuesto tratado [10].

Dentro de los materiales más estudiados y utilizados para este fin se tiene el dióxido de titanio (TiO_2), el cual destaca por su alta actividad fotocatalítica, estabilidad química, no toxicidad y bajo costo. El dióxido de titanio (TiO_2) es un material versátil con aplicaciones en diversos campos, como la medicina, la cosmética, la fabricación de pinturas y papel, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías. Entre sus usos más destacados se encuentra su empleo en procesos fotocatalíticos para la descontaminación del agua [11]. Su popularidad se debe a sus propiedades estructurales, conductividad y capacidad fotocatalítica, además de su bajo costo y facilidad de síntesis. Sin embargo, en el contexto de los procesos avanzados de oxidación, presenta dos limitaciones significativas que afectan su eficiencia [12].

El TiO_2 actúa mediante la captación de fotones cuya energía es igual o mayor que la de su brecha de banda (aproximadamente 3.2 eV en su fase anatasa), lo que produce pares de electrones y huecos. Estos pares interactúan en procesos redox con los compuestos absorbidos en la superficie

del catalizador [13]. Como resultado, se logra la descomposición de moléculas orgánicas complejas en efluentes como las vinazas, transformándose en sustancias menos contaminantes, tales como dióxido de carbono y agua.

Previas investigaciones han evaluado el uso del TiO_2 para la degradación de compuestos presentes en las vinazas. Un estudio realizado por Sánchez *et al*., [13] demostró que, mediante fotocatálisis con TiO_2 y luz UV, se logró eliminar hasta el 70% de la demanda química de oxígeno (DQO) en vinazas derivadas de la producción de tequila. No obstante, factores como el pH del medio, la carga de contaminantes, la potencia de la radiación lumínica y el diseño del reactor influyen significativamente en la efectividad del tratamiento [14].

En general, las conclusiones a las que se ha llegado, se destaca que la fotocatálisis heterogénea utilizando TiO_2 representa una alternativa viable para el tratamiento de vinazas tequileras, ofreciendo una opción más sostenible en comparación con métodos convencionales. No obstante, aún es necesario evaluar su viabilidad a escala industrial y optimizar las condiciones de operación para maximizar su eficiencia.

PARTE EXPERIMENTAL

La vinaza fue obtenida de una empresa productora de tequila local en el municipio de Arandas Jalisco.

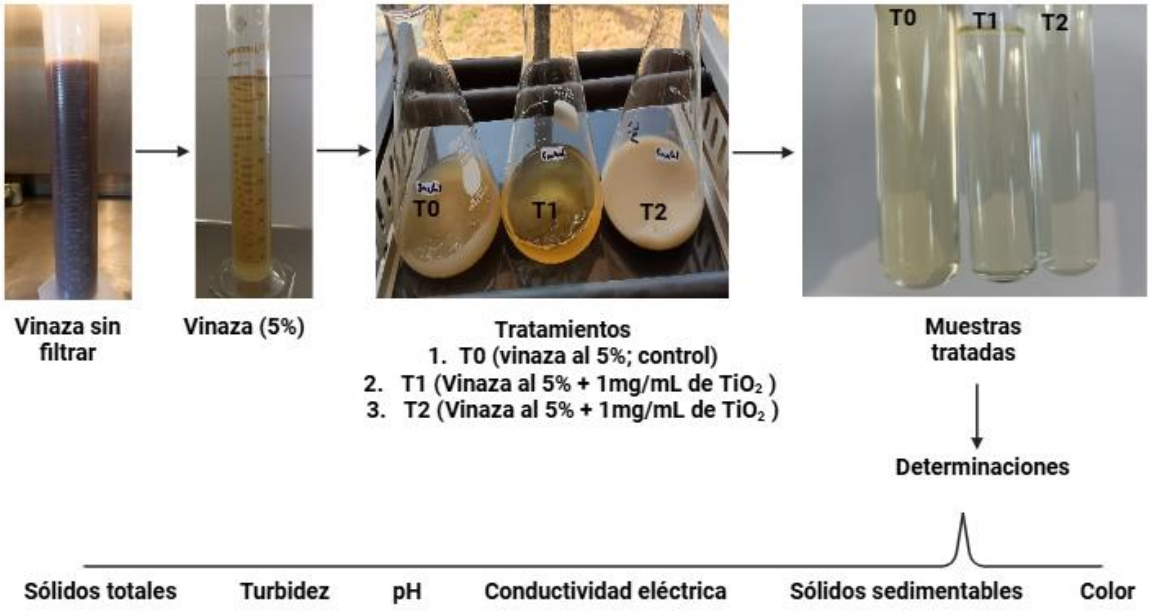


Figura 1. Diagrama experimental utilizado para el desarrollo de este proyecto.

Preparación de la muestra

La muestra fue filtrada a vacío con un filtro con poro de 20 micras con la finalidad de reducir la carga total de sólidos totales. Posteriormente se tomó una alícuota de 5 mL de la vinaza previamente filtrada y se aforó a 100 mL con la finalidad de poder evaluar la viabilidad fotocatalítica del TiO_2. Se colocaron 100 mL de la vinaza al 5% en vinazas y se tomó como control (T0), a los tratamientos se les añadió TiO_2 en concentraciones de 1 mg/mL (T1) y 5 mg/mL (T2).

Determinación de sólidos totales

La determinación de sólidos totales (ST) en vinazas es un parámetro clave para evaluar la carga de contaminantes y diseñar sistemas de tratamiento. Esta técnica gravimétrica, cuantifica todos los

sólidos presentes en una muestra, incluyendo disueltos y suspendidos, mediante secado a 105°C hasta peso constante [15]. Para ello se llevan los crisoles vacíos a peso constante y se registra el peso inicial (W1), se colocaron 20 mL de la muestra (V) y se calienta a 105 °C hasta peso constante y se pasa el crisol con los sólidos totales (W2). Para calcular el contenido de sólidos totales se utilizó la ecuación 1:

$$\boldsymbol{Porcentaje\ de\ sólidos\ totales}: \frac{\boldsymbol{W2\ -\ W1}}{\boldsymbol{V}} * \boldsymbol{100}$$

Determinación de turbidez y color

Para la medición de la turbidez se utilizó el dispositivo conocido como turbidímetro el cual mide en Unidades Netfelométricas (NTU) la turbidez de la muestra, para esto se calibra el dispositivo con dos soluciones base de concentración conocida y luego se evaluó la muestra [16]. Se utilizó un turbidímetro (marca: modelo) y se calibró con soluciones de 0, 50 y 500 NTU de acuerdo a las instrucciones del proveedor y posteriormente se realizó la medición de cada una de las muestras tratadas y control.

Medición del pH y la conductividad eléctrica

Para la medición del pH y la conductividad eléctrica (CE) en aguas residuales, se emplearon procedimientos basados en las normas mexicanas NMX-AA-008-SCFI-2016 y NMX-AA-093-SCFI-2000, respectivamente [17, 18]. El pH se determinó mediante un potenciómetro con electrodo de vidrio, previamente calibrado. El electrodo se enjuaga con agua destilada, se sumergió en la muestra y, tras estabilizar la lectura, se registró el valor de pH y conductividad eléctrica a 25 °C.

Determinación de los sólidos sedimentables

Para la medición de sólidos suspendidos totales en aguas residuales, se empleó el método establecido en la norma mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013 [19]. Este procedimiento consiste en llenar un cono Imhoff con un litro de muestra de agua residual y dejarlo reposar sin agitación durante un período de 60 minutos. Transcurrido este tiempo, se registra el volumen de sólidos sedimentados que se acumulan en la parte inferior del cono, expresado en mililitros por litro (mL/L).

RESULTADOS

Modificar el pH de las vinazas tequileras es un paso crucial en su tratamiento, ya que estas aguas residuales suelen ser altamente ácidas. Ajustar su pH a niveles más neutros mejora la eficiencia de procesos como la sedimentación, la degradación y la neutralización de contaminantes. Además, un pH controlado reduce la toxicidad del efluente, facilitando su manejo, reutilización o disposición final sin dañar el medio ambiente. En este sentido el valor del pH para los tratamiento fueron de 1 mg/mL fue de 4.54 mientras que para el tratamiento 5 mg/mL fue de 4.7 en comparación del control que tenía un pH inicial de 4.4

Los sólidos totales mostraron reducciones de 52% y 86% en los ST, a las concentraciones de 1 mg/mL y 5 mg/mL, respectivamente.

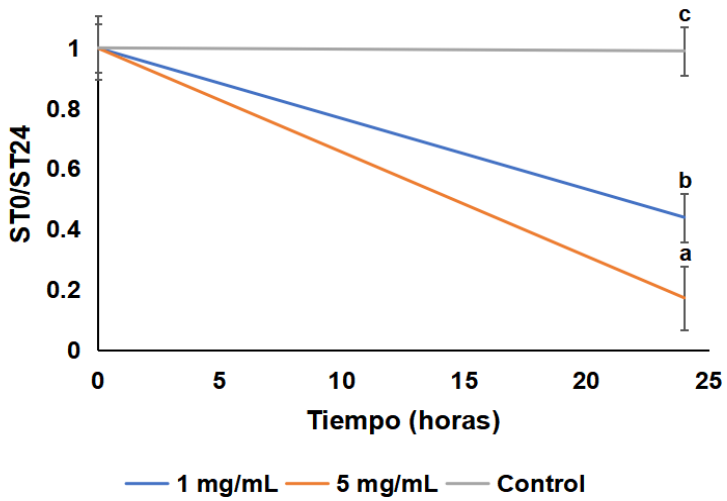


Figura 2. Cinética de reducción de sólidos totales en muestras de vinaza al 5% tratadas con dióxido de titanio (tipo de TIO2) 1 mg/mL y 5 mg/mL.

La reducción de sólidos totales (ST) en vinazas es esencial para minimizar su impacto ambiental, ya que altas concentraciones pueden contaminar cuerpos de agua y suelos, afectando la biodiversidad y la calidad de los recursos. Además, el tratamiento eficiente de estos residuos reduce costos operativos y facilita el cumplimiento de normativas ambientales estrictas. Por otro lado, el control de ST permite valorizar las vinazas mediante su reuso en agricultura o generación de biogás, impulsando prácticas sostenibles.

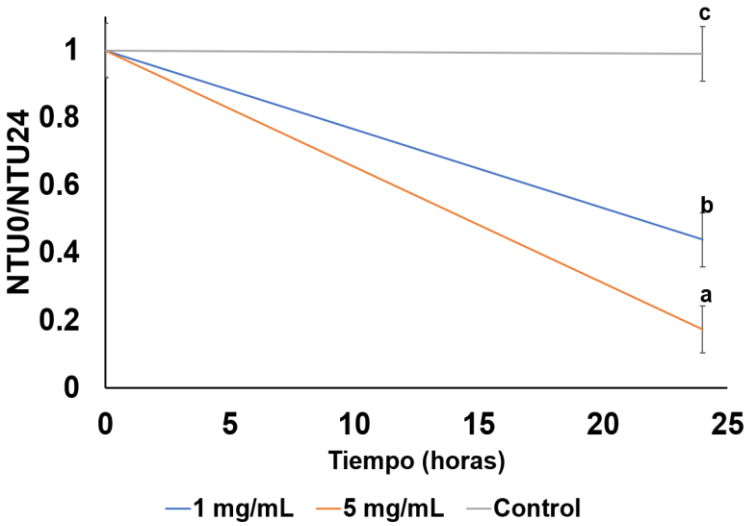


Figura 3. Cinética de reducción de turbidez en muestras de vinaza al 5% tratadas con dióxido de titanio (tipo de TIO2) 1 mg/mL y 5 mg/mL.

Por otro lado, la conductividad eléctrica (CE) de vinazas tratadas debe mantenerse por debajo de 4 dS/m para su uso agrícola seguro, ya que valores superiores afectan la absorción de agua por las plantas y degradan la estructura del suelo. CE entre 4 y 8 dS/m es tolerable sólo para cultivos moderadamente salinos y bajo manejo controlado. Por encima de 8 dS/m, el uso agrícola se vuelve inviable sin tratamiento adicional o dilución, debido al alto riesgo de salinización y daño al sistema edáfico. En este sentido en la figura 4 es posible observar una disminución del 16% y 18% en la cinética de disminución de la conductividad eléctrica para las concentraciones de 1 mg/mL y 5 mg/mL respectivamente. No obstante el valor inicial de la vinaza fue de 246 dS/m para la vinaza control y

después de 24 horas estos valores disminuyeron a 209 y 202 dS/m para los tratamientos con TiO2 1 mg/mL y 5 mg/mL respectivamente. Si bien la disminución fue representativa y significativa (p<0-05) los valores no son aceptables en la vinaza tratada para un segundo uso en agricultura.

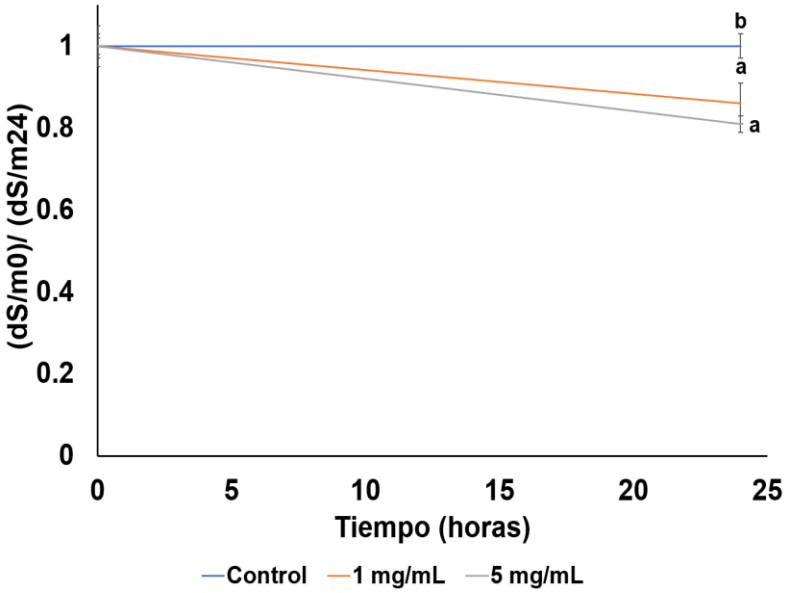


Figura 4. Cinética de reducción de turbidez en muestras de vinaza al 5% tratadas con dióxido de titanio (tipo de TIO2) 1 mg/mL y 5 mg/mL.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que el potencial de tratamiento de vinazas tequileras implementando la fotocatálisis con TiO_2, los resultados parecen prometedores como una alternativa viable a utilizar, destacando su capacidad para modular parámetros críticos como el pH y los sólidos totales (ST). El ajuste del pH a 4.54 y 4.7 (1 y 5 mg/mL de TiO_2) favoreció procesos de degradación y neutralización, mientras que las reducciones de ST (52% y 86%) evidenciaron una mitigación significativa de carga contaminante, facilitando su potencial reutilización en agricultura o biogás. Sin embargo, la conductividad eléctrica (CE) postratamiento (209-202 dS/m) sigue siendo extremadamente elevada, superando en más de 50 veces el límite seguro para uso agrícola (4 dS/m), a pesar de la disminución significativa (16-18%, $p<0.05$). Esto limita su aplicación directa en suelos sin etapas adicionales de dilución o tratamiento. Los resultados resaltan la eficacia del TiO_2 en etapas primarias de descontaminación, pero subrayan la necesidad de integrar procesos complementarios para abordar la alta salinidad residual. La técnica promueve prácticas sostenibles al reducir costos operativos y alinearse con normativas ambientales, aunque su escalabilidad requerirá optimizar dosis, tiempos de exposición y sinergias con otros métodos, asegurando un enfoque integral hacia la economía circular en la industria tequilera.

REFERENCIAS

1. Ibarra-Camacho, R., & León-Duharte, L. (2018). Caracterización químico-física de vinazas de destilerías. Ciencia en su PC,1(2), 1-13.
2. Gutiérrez-Hernández, J. M., García-Sánchez, J. J., & Martínez-Salvador, C. (2018). Caracterización y tratamiento de vinazas de tequila: una revisión. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 34(3), 487-499.
3. Consejo Regulador del Tequila. Producción total: Tequila y tequila 100%. (2024). Consejo Regulador del Tequila (CRT). https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb. (consulta febrero 2025).

4. López-López, A., Martínez-Salvador, C., & García-Sánchez, J. J. (2020). Impacto ambiental de las vinazas de tequila y estrategias de mitigación. Revista de Ciencias Ambientales, 54(1), 23-35.
5. Martínez-Salvador, C., Gutiérrez-Hernández, J. M., & García-Sánchez, J. J. (2019). Efectos de las vinazas de tequila en suelos y cuerpos de agua: un análisis crítico. Revista de Investigación Ambiental, 41(2), 123-135.
6. Topete, N. G. M. A., & Covarrubias, G. I. (2015). Fertilizante orgánico obtenido de las vinazas tequileras y estiércol de ganado. InterScience Place, 1(4).
7. Espinoza-Escalante, F. M., Pelayo-Ortiz, C., Gutiérrez-Corona, J. F., Alcaraz-González, V., & González-Álvarez, V. (2017). Tratamiento de vinazas de tequila mediante digestión anaeróbica: una revisión. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 16(2), 345-356.
8. García-Sánchez, J. J., Martínez-Salvador, C., & López-López, A. (2021). Técnicas avanzadas para el tratamiento de vinazas de tequila: oxidación electroquímica y filtración con membranas. Revista de Ingeniería Química y Ambiental, 12(4), 567-579.
9. Herrmann, J. M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: Fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. Catalysis Today, 53(1), 115-129. https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00107-8
10. Blanco, J. (2001). Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, en Diseño de Reactores para fotocatálisis, evaluación comparativa de las distintas opciones, M. Blesa, ed., pp. 243-266, Mar del Plata.
11. Escobar-Alarcón, Luis, & Solís-Casados, Dora Alicia. (2021). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO2 en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 14(26), 00001. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646.
12. Tianhu Zhang, Yuanjun Liu, Yandi Rao, Xiaopeng Li, Deling Yuan, Shoufeng Tang, Qingxin Zhao. (2020). Enhanced photocatalytic activity of TiO2 with acetylene black and persulfate for degradation of tetracycline hydrochloride under visible light. Chemical Engineering Journal, Vol. 384 (1). https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123350
13. Sánchez, M., Cruz, C., & Pérez, J. (2017). Degradación de vinazas de tequila mediante procesos fotocatalíticos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 33(3), 389-397. https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.06
14. Bautista-Gallego, J., Velezmoro, C., Martínez-Camacho, A., & Vázquez-Villalobos, J. (2021). Advanced oxidation processes for the treatment of vinasses: A review. Journal of Environmental Management, 298, 113492. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113492
15. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo de 2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11%2F03%2F2022
16. Secretaría de Economía. (2001). *NMX-AA-038-SCFI-2001: Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf
17. Secretaría de Economía. (2016). *NMX-AA-008-SCFI-2016: Análisis de agua – Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
18. Secretaría de Economía. (2018). *NMX-AA-093-SCFI-2018: Análisis de agua – Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación
19. Secretaría de Economía. (2013). *NMX-AA-004-SCFI-2013: Análisis de agua – Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf

Bacillus Subtillis EN LA GERMINACIÓN DEL CHILE YAHUALICA (*Capsicum Annuum L.*)

Esmeralda Plascencia-Ulloa[1], Lily X. Zelaya-Molina[2]*, Ismael F. Chávez-Díaz[2,] Edgardo Bautista-Ramírez[3], Nelly E. Cortés-Martínez[4], Zoe Reséndiz-Venado[5]

[1]Centro Universitario de la Costa-UdeG. A, [2]Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP, [3]Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-CIRPAC-INIFAP, [4]Centro Universitario de los Altos-UdeG, [5]Centro Universitario de los Lagos-UdeG.
lilyzelaya@yahoo.com.mx

RESUMEN

El chile Yahualica es un cultivo de gran importancia en la región de los Altos de Jalisco, donde se cultiva para obtener frutos frescos y secos. El proceso de producción abarca diversas etapas, desde la germinación de las plántulas y la preparación del terreno, hasta la cosecha, el secado y la selección de semillas[1]. Actualmente, el uso de microorganismos promotores de crecimiento vegetal en cultivos hortícolas ha tenido gran auge; entre ellas, cepas de *Bacillus subtilis* incrementan la germinación, desarrollo y rendimiento del cultivo debido a la producción de metabolitos promotores de crecimiento vegetal y al mejoramiento de la nutrición de las plantas[2]. Esta investigación tiene como objetivo evaluar el potencial de *Bacillus subtilis* CBB1-1 y CBB1-2 sobre la germinación del chile de Yahualica. *B. subtilis* CBB1-1 y CBB1-2 se evaluaron mediante una prueba de germinación modificada con semillas de chile Yahualica colectadas en el municipio de Yahualica. Las semillas se desinfectaron en cámara de gas; posteriormente, se colocaron 10 semillas en papel de germinación estéril, con 4 réplicas por tratamiento. Se añadieron 10 ml de cada suspensión bacteriana a cada rollo de papel de cada tratamiento; al control, se añadieron 10 ml de agua estéril. Todos los rollos de papel se incubaron en cámara de crecimiento durante 21 días. Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de comparaciones múltiples de Tukey, considerando diferencias significativas con $p<0.05$. El análisis de los resultados reveló que *B. subtilis* CBB1-2 incrementó significativamente la longitud de la parte área de la planta y en el número de semillas germinadas de chile Yahualica, lo que sugiere un efecto positivo en el crecimiento y la germinación. Se concluye que B. *subtilis* CBB1-2 tiene un efecto significativo en el crecimiento y la germinación del chile Yahualica, esta bacteria podría ser utilizada como un biofertilizante para promover germinación y desarrollo de plantas de chile Yahualica.

INTRODUCCIÓN

El chile Yahualica, con su Denominación de Origen (DO), es un cultivo esencial en los Altos de Jalisco y el sur de Zacatecas. Esta denominación protege y certifica las características únicas y distintivas de este chile, como su sabor, textura y picor, que son resultado de las condiciones ambientales particulares de la región. El territorio amparado por la DO abarca once municipios, nueve en Jalisco (Yahualica de González Gallo, Mexticacán, Teocaltiche, Cañadas de Obregón, Jalostotitlán, Encarnación de Díaz, Villa Hidalgo, Cuquío e Ixtlahuacán del Río) y dos en Zacatecas (Nochistlán de Mejía y Apulco), siendo Yahualica el principal productor. La producción artesanal del chile Yahualica, que va desde la selección de la semilla hasta el producto fresco o seco, ha trascendido su valor gastronómico, convirtiéndose en un símbolo de identidad cultural y económico para la zona[3].

Sin embargo, el cultivo del chile Yahualica llega a tener problemas sanitarios y dificultades en la germinación de las semillas, afectando la productividad del cultivo. Ante este escenario, los productores utilizan fertilizantes químicos en el cultivo, que no solo encarecen la producción, sino que también tienen efectos negativos sobre el medioambiente. Actualmente, las alternativas biológicas para mejorar el desarrollo y crecimiento vegetal desde la germinación, son una de las opciones más empleadas, debido a la capacidad de microorganismos promotores de crecimiento vegetal de mejorar la disponibilidad de nutrientes y controlar plagas y enfermedades.

Cepas promotoras de crecimiento vegetal de *Bacillus subtilis* poseen mecanismos que benefician directamente a las plantas, mejorando la nutrición vegetal a través de la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fosfatos y potenciando el crecimiento mediante la producción de fitohormonas [4]. Su aplicación como agente promotor del crecimiento en el chile Yahualica podría disminuir la aplicación de agroquímicos y aumentar la productividad del cultivo, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y a la prevención de la erosión del suelo.

El objetivo de esta investigación es evaluar las cepas de *Bacillus subtilis* CBB1-1 y CBB1-2 para mejorar el crecimiento del chile Yahualica, ofreciendo así una alternativa sostenible y eficaz para los agricultores de la región.

TEORÍA

La agrobiotecnología destaca el manejo de la rizosfera con Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPB) para una agricultura sostenible. Entre las especies más evaluadas se encuentran las pertenecientes al género *Bacillus,* ya que mejoran la nutrición y protegen las plantas. Un estudio investigó el potencial de cuatro cepas de *Bacillus*, aisladas de cultivos de maíz y cafeto, para promover el crecimiento de tres cultivos importantes: maíz en condiciones controladas de invernadero. Los resultados demostraron que la inoculación con estas cepas de *Bacillus* tuvo un efecto positivo en la germinación de las semillas de maíz, incrementando el porcentaje de germinación, el índice de velocidad y el vigor de las plántulas. En cuanto al desarrollo posterior del maíz, se observó que algunas cepas específicas promovieron de manera significativa el crecimiento de la raíz[5].

Varios estudios realizaron investigaciones sobre los beneficios de la utilización de los microorganismos en el crecimiento vegetal. Instituciones como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) han investigado y evaluado la acción biofertilizante de microorganismos eficientes, definiendo los "inoculantes biológicos" como productos que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la absorción de nutrientes. También, estudios como los de la Pontificia Universidad Católica de Chile han demostrado la ineficiencia del uso exclusivo de fertilizantes químicos, donde gran parte del nitrógeno aplicado se pierde al ambiente. En este sentido*, Bacillus subtilis* emerge como un microorganismo con potencial significativo. Su capacidad para formar esporas resistentes a condiciones adversas facilita la formulación de productos estables que benefician los cultivos a través de mecanismos directos e indirectos. Específicamente, *Bacillus subtilis* mejora la nutrición vegetal mediante la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fosfatos, y potencia el crecimiento a través de la producción de fitohormonas[6].

Otros estudios evalúan el efecto de combinar microorganismos benéficos con fungicidas durante la siembra. En una evaluación de maní, los resultados mostraron que la aplicación conjunta de *Bacillus subtilis* y fungicidas tuvo un impacto positivo significativo en las etapas tempranas del desarrollo del cultivo, en comparación con las semillas no tratadas y las tratadas solo con fungicida. La combinación con *Bacillus subtilis* mejoró notablemente la germinación de las semillas, resultando en un mayor porcentaje de plántulas emergidas y un incremento en su vigor inicial. Estas plántulas también exhibieron mejores características de crecimiento temprano, como una mayor longitud de raíz y tallo, sugiriendo un establecimiento más eficiente. A nivel de campo, a los 30 días después de la siembra, se observó una mayor densidad de plantas y un crecimiento inicial más vigoroso en los tratamientos que incluyeron *Bacillus subtilis* junto con el fungicida, lo que indica un beneficio claro de esta combinación en las primeras fases del desarrollo del cultivo de maní[7]. Por lo que considerar un manejo integrado de los cultivos también es una buena opción que beneficia su producción.

PARTE EXPERIMENTAL

Las semillas de chile Yahualica se recolectaron en el municipio de Yahualica de González Gallo y se evaluaron mediante una prueba de germinación modificada. La desinfección fue mediante cámara de gas, método que asegura la esterilización y la eliminación de residuos. El procedimiento consiste

en introducir un vaso de precipitados de vidrio en un recipiente de plástico, que servirá como cámara de gas, y se añaden en el vaso 6.25 ml de cloro comercial (NaClO) y se añade cuidadosamente 0.25 ml de ácido clorhídrico (HCl). Las semillas previamente lavadas con agua corriente y secadas, se colocan sobre gasas. La gasa con las semillas se suspende cuidadosamente sobre la boca del recipiente, asegurando que no entre en contacto directo con la solución desinfectante en el fondo. Una vez que las semillas están posicionadas correctamente, el recipiente se sella herméticamente con su tapa. La exposición a los vapores generados por la mezcla de cloro y ácido clorhídrico se mantiene durante 4 horas. Este tiempo de exposición asegura la penetración de los vapores desinfectantes en las semillas, eliminando eficazmente cualquier microorganismo presente (Figura 1A).

Tras la desinfección, se realizó un bioensayo en papel de germinación estéril, en cada tratamiento se realizó una suspensión bacteriana con las cepas CBB1-1 y CBB1-2; al control se añadió agua estéril. Se preparó el inóculo bacteriano ajustando una suspensión de bacterias en agua destilada estéril a una concentración de 0.5 en la escala de McFarland. Cada hoja de papel se dobló por la mitad y se extendió, proporcionando una superficie sobre la cual se colocaron 10 semillas desinfectadas de chile Yahualica. Las semillas se colocaron intercaladamente en 2 filas de 5 semillas cada una. Después de colocar las semillas, se dobló el papel para cubrirlas, creando un rollo o taco. Cada taco se inoculó con 10 ml del inóculo bacteriano preparado, asegurando una distribución uniforme del inóculo sobre las semillas. Se prepararon 4 réplicas para cada tratamiento, incluyendo un control. Evitando mojar en exceso los tacos para prevenir charcos, que podrían afectar la germinación. Los tacos se colocaron en un bote, envueltos en bolsas tanto en la parte inferior como superior para mantener la humedad y esterilidad (Figura 1B). Los tacos se incubaron en una cámara de germinación, donde se mantuvieron las condiciones óptimas para la germinación. Se realizaron riegos con agua destilada estéril cada semana para asegurar la humedad adecuada durante el periodo de incubación. La duración de la incubación fue de 21 días.

Tras la incubación, se abrieron los tacos de germinación y se contaron las semillas muertas, anormales y normales, así como el número total de plántulas. Se midieron la parte aérea y la raíz de las plántulas. Se pesaron la parte aérea y la raíz (peso fresco). Las muestras se secaron durante 5 días a 60°C y se pesaron nuevamente (peso seco). Se registraron los datos de: germinación, mediciones y pesos. Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de comparaciones múltiples de Tukey, considerando diferencias significativas con $p<0.05$.

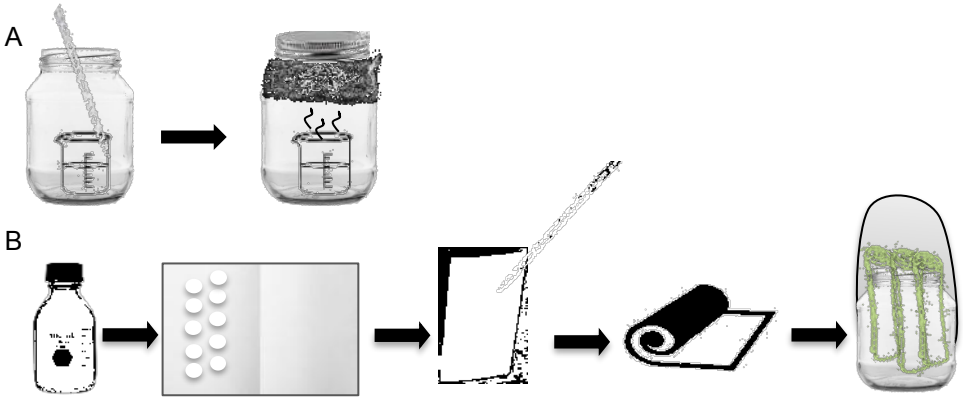


Figura 1.- Procedimientos: (A) Cámara de gas (B) Bioensayo para el tratamiento de germinación.

RESULTADOS

Los tratamientos de *Bacillus subtilis,* la cepa CBB1-2 demostró un efecto significativo en la germinación de semillas y en el crecimiento de la parte aérea de las plantas de chile Yahualica (Figura 2). En la germinación de semillas se observó diferencias significativas, tanto en el número de plántulas normales como anormales. La cepa CBB1-2 mostró una considerable diferencia, con un aumento del 63% en el número de plántulas normales y una disminución del 32% de plántulas anormales. Los datos de la cepa CBB1-1 no mostraron diferencias significativas con el control.

De igual maneral, la cepa CBB1-2 genero una diferencia significativa en el aumento del crecimiento aéreo de las plántulas, con un valor de 2.75 cm en comparación con el grupo control de 1.72 cm. A pesar de los efectos positivos observados en la germinación de semillas y en la longitud de la planta, no se encontraron diferencias significativas en la longitud de la raíz y tampoco en el peso fresco y seco de la planta y la raíz (Cuadro 1).

Cuadro 1.- Evaluación en la germinación de semillas de Chile Yahualica con *Bacillus subtilis* CBB1-1 y CBB1-2.

Variables	Control	CBB1-1	CBB1-2	Significancia (p=0.05)
Germinación de la plántula (%)				
Normales	5.2 A	5.7 A	8.5 B	*
Anormales	4.7 A	4.2 A	1.5 B	*
Largo (cm)				
Plántula aérea	1.72 A	1.98 A	2.75 B	*
Raíz	8.60 A	8.15 A	8.92 A	-
Peso fresco (g)				
Plántula aérea	0.02 A	0.01 A	0.02 A	-
Raíz	0.04 A	0.03 A	0.07 A	-
Peso seco (g)				
Plántula área	0.01 A	0.01 A	0.01 A	-
Raíz	O.01 A	0.01 A	0.01 A	-

Valores expresados como media. La significancia estadística ($p < 0.05$) se determinó mediante la prueba de Tukey. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable.

CONCLUSIONES

Estos resultados indican que *B. subtilis* CBB1-2 tiene un impacto positivo en la germinación de semillas y en el crecimiento aéreo de la plántula del chile Yahualica, esta bacteria podría ser utilizada como un biofertilizante para promover germinación y desarrollo de plantas de chile Yahualica. La aplicación de esta bacteria podría ser útil para los productores, ya que puede contribuir a la disminución del uso de agroquímicos y a la reducción de la erosión del suelo, promoviendo así prácticas agrícolas más sostenibles.

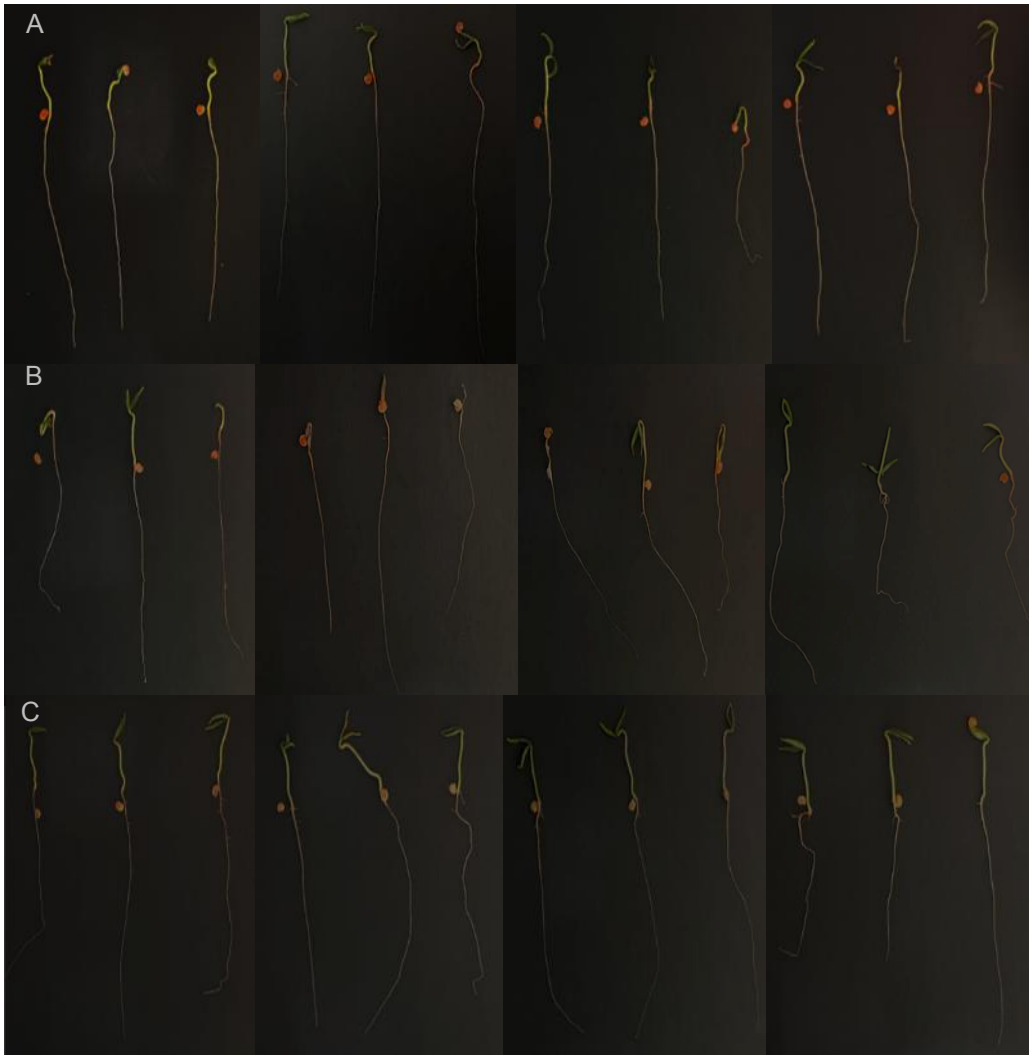


Figura 2.- Plántulas de chile Yahualica a los 21 días de germinacióm, mostrando el efecto de los tratamientos: (A) Control, (B) *Bacillus subtilis* CBB1-1, (C) *Bacillus subtilis* CBB1-2.

BIBLIOGRAFÍA

1. NOM_239_SE_2020, NORMA Oficial Mexicana NOM-239_SE_2020, “Chile Yahualica (Capsicum annuum L.)-Denominación-Especificaciones”, información comercial y métodos de prueba. Secretaría de Economía, México. DOF, 2021.
2. F.L. Vega, “Microorganismos antagonistas para el control fitosanitario”, Manejo integrado de plagas, No.62, 2021, pp. 96-100.
3. K. A. Amador García, J. O. García García, “Diagnóstico de la producción del chile de árbol de los municipios de la ruta del chile Yahualica”, Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, Vol. I: 978-607-30-2640-6, 2019.
4. Y. G. León, J. O. Bernal, M. A. Reyes. Y. M. Flores, “Bacillus subtilis y Trichoderma: Características generals y su aplicación en la agricultura” SCIELO, Vol. 25, 2022.

5. M.R. Badía, M.B. González, Y.R. Rocajull, D. L.Moya, J.R. Sánchez, “Utilización de cepas de *Bacillus* como promotores de crecimiento en hortalizas comerciales” Acta Agronómica., Vol. 69, 1, 2020, pp. 54-60.
6. L.C. Ramírez, L.C. Lozano, M.A Gómez, S. J. Ramos, J. N. Rodríguez, “*Bacillus* spp: una alternativa para la promocion vegetal por dos caminos enzimáticos” SCIELO, Vol. 15,27,2017.
7. C. S. Illa, P. M. Yadarola, M. A. Pérez, “Tratamientos de presiembra para mejorar la germinación y vigor de semillas de maní” 2020. Memorias del 1° Congreso Argentino de Semillas "Germinando nuevas ideas”: libro de resúmenes, ISBN: 9789878688374.

IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS PARA LA DEGRADACIÓN DE PLÁSTICOS

Sandra Lizbeth Ramírez Pérez[1], Amador Roberto Campos Valdez[1], Andrés Méndez Zamora[1], María Marcela Robles Machuca[2], Leticia Casas Godoy[3*]

[1]Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Unidad de Biotecnología Industrial, Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal, 45019, Zapopan, Jalisco, México, [2]Universidad Autónoma de Nayarit. Secretaría de Investigación y Posgrado. Ciudad de la Cultura s/n Centro, 63000, Tepic, Nayarit, México, [3]SECIHTI–Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Unidad de Biotecnología Industrial, Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal, 45019, Zapopan, Jalisco, México.

*lcasas@ciatej.mx

RESUMEN

Los plásticos forman parte de miles de productos que facilitan nuestra vida diaria. Sin embargo, estos plásticos tienen un tiempo de degradación entre 10 y 1000 años[1], dependiendo del tratamiento posconsumo utilizado. En las últimas décadas se ha investigado la forma de degradar plásticos con ayuda de microorganismos y sus enzimas entre las cuales se encuentran reportadas las alcanohidroxilasas, las lipasas, las cutinasas y las esterasas[2]. En este estudio se realizó un cribado en caja para detectar actividades enzimáticas de 27 cepas bacterianas previamente aisladas de suelos contaminados con plásticos de los estados de Jalisco y Nayarit. Se utilizó un medio compuesto por (g/L): triptona 10, extracto de levadura 5, agar 20, rodamina 0.001% p/v y emulsión de inductores 10. Los inductores utilizados fueron: tributirina, aceite de oliva y aceite de linaza para evaluar la actividad esterasa, lipasa y cutinasa, respectivamente, y tres derivados del petróleo: aceite mineral, Triton X-100 y polietilenglicol (PEG) para analizar la capacidad de las cepas para estos compuestos. Las cepas fueron incubadas a 30°C durante 4 días y el halo de degradación fue observado bajo luz blanca y ultravioleta (UV). Las actividades enzimáticas se clasificaron de acuerdo con el tamaño del halo (medido con luz blanca) y la intensidad bajo luz UV. De 11 cepas identificadas como *Serratia marcescens*, el 63.6% presentaron una fuerte actividad cutinasa y degradación de aceite mineral, siendo la cepa A128L con mayor tamaño de halo12.9 mm en actividad cutinasa y la cepa A18A en aceite mineral 11.67 mm. *Serratia nematodiphila*, *Serratia grimesii* y *Serratia plymuthica* presentaron actividad cutinasa con halos de 11.43 mm (A126E), 10.44 mm (Y26G) y 8.62 mm (A27G), respectivamente. Destacaron las cepas de *Chyseobactetium oncorhynchi* por su alta actividad esterasa, cutinasa, lipasa y capacidad de degradación de aceite mineral. *Pseudomonas clororaphis* también mostró una alta actividad esterasa, lipasa y cutinasa con halos de 8.44 mm, 11.61 mm y 11.27 mm, respectivamente, pertenecientes a la cepa Y32B3. En cuanto a los sustratos más complejos, *S. marcescens* (A128L, 10.17 mm) y de *Bacillus cereus* (A30C, 10.59 mm) mostraron una alta capacidad de degradar PEG, mientras que *S. marcescens* (A18A) fue la única que mostró degradación media de Triton X-100. También se analizó la capacidad de estas cepas para crecer en un medio mínimo de sales con polietileno de baja densidad lineal (LDPE) y tereftalato de polietileno (PET) como única fuente de carbono, observando crecimiento de todas las cepas estudiadas. Los cribados realizados han permitido identificar la diversidad metabólica y enzimática de las especies presentes en suelos contaminados con plásticos. Los resultados sugieren que estas especies poseen la maquinaria enzimática necesaria para llevar a cabo la degradación de plásticos, lo que abre nuevas posibilidades para el tratamiento biológico de suelos contaminados.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos forman parte de nuestra vida diaria ya que están presentes en casi todo lo que nos rodea. Por ejemplo, en el ámbito comercial se utilizan en envases para alimentos, detergentes, productos de limpieza personal, así como en piezas para automóviles, cubiertas para celulares, jeringas, entre otros. Estos materiales son polímeros orgánicos producidos a partir de recursos no renovables, como el gas natural, el carbón y el petróleo crudo[1,3] e incluyen el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno (PET)[2].

Con base en sus propiedades térmicas, los plásticos sintéticos se pueden clasificar en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos (*p. ej.* PE, PP, PS, PVC) pueden ser modificados después de fundirse y son resistentes a la degradación o escisión hidrolítica. En cambio, los termoestables, como las resinas acrílicas, resinas epóxicas, poliéster, PET, poliuretano (PU), silicona y resinas vinílicas, presentan cambios químicos generados por el calor que son irreversibles, lo que los hace susceptibles a la escisión hidrolítica[4].

Existen diversas técnicas para la degradación de los plásticos, basadas en la ruptura de los enlaces químicos por procesos físicos o químicos[5]. Entre ella se encuentran la degradación térmica, mecánica, química, fotoquímica, por radiación y biológica. Entre estas técnicas, destaca la biodegradación, que se caracteriza por ser un proceso mediante el cual organismos como bacterias y hongos transforman o alteran la estructura de compuestos químicos introducidos en el ambiente[6]. A través de acciones metabólicas o enzimáticas, y bajo condiciones especiales, estos organismos pueden atacar poliésteres alifáticos, poliuretanos y poliamidas[5,6] rompiendo enlaces y generando monómeros o intermediarios más simples[7].

Entre las enzimas más relevantes para la degradación de plásticos se encuentran las enzimas extracelulares las cuales incluyen actividades oxidativas e hidrolíticas. En particular, las hidrolasas, como lipasas y proteasas, tienen la capacidad de modificar la superficie de los microplásticos, generando un aumento en su hidrofobicidad sin necesariamente degradar sus componentes básicos[1,2].

En la actualidad, se han identificado diversas enzimas con la capacidad de degradar polímeros sintéticos, como el PE, a través de la acción de enzimas conocidas como PEasas[8]. Dentro de este grupo se incluyen las lacasas, las peroxidasas de manganeso (MnP) y las peroxidasas de lignina (LiP). Por otro lado, hidrolasas como lipasas, esterasas y cutinasas han demostrado eficacia en la degradación tanto de PE como de PET[8]. Otras enzimas, como las amidasas, oxidasas y peroxidasas, también participan en la descomposición de polímeros como PE, PU y polietileno de alta densidad (HDPE)[9,10].

Según se resume en distintas revisiones e investigaciones, diversas especies de microorganismos han sido asociadas con la biodegradación de distintos tipos de plásticos. Entre las especies destacadas en revisiones, se encuentran *Pseudomonas aeruginosa* E7, asociada con la degradación de polietileno de baja densidad (LDPE), y *P. aeruginosa* DSM 50071, relacionada con la degradación de PS[11]. Asimismo, *Serratia plymuthica* ha sido vinculada a la biodegradación del PET, mientras que diferentes cepas de *Bacillus* sp. han mostrado capacidad para degradar PP[11], LDPE, HDPE y poliéster[12].

También se han reportado *Bacillus cereus* con actividad sobre PE y LDPE[12], *Pseudomonas* sp. E4 sobre polietileno de bajo peso molecular (LMWPE), *Pseudomonas* sp. AKS2 sobre LDPE, y *Serratia marcescens* sobre polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)[13]. Finalmente, se ha documentado que *Exiguobacterium* sp. YT2 puede degradar PS, y *Pseudomonas chlororaphis* presenta actividad sobre poliuretano (PUR)[13].

TEORÍA

Las hidrolasas catalizan la hidrólisis de enlaces químicos, dividiendo una molécula grande en dos más pequeñas. Actúan sobre distintos tipos de enlaces como carbono-oxígeno (C-O), carbono-nitrógeno (C-N), carbono-carbono (C-C), fósforo-nitrógeno (P-N), entre otros[14]. Además, esta clase de enzimas es considerada la más amplia y diversa, con más de 200 tipos diferentes de enzimas con funciones específicas[14].

Las enzimas hidrolíticas tienen una amplia variedad de aplicaciones. Industrias como la de detergentes, cuero, textiles, pulpa y papel, alimentos y piensos, productos lácteos, biocombustibles y tratamiento de residuos dependen en gran medida del uso de hidrolasas. Entre estas enzimas, las

carbohidrasas, proteasas y lipasas son las más utilizadas, representando más del 70 % del total de ventas de enzimas a nivel mundial[14].

Las lipasas (EC 3.1.1.1, hidrolasas de triacilglicerol) y las esterasas «verdaderas» (EC 3.1.1.3, hidrolasas de ésteres carboxílicos) tienen en su estructura tridimensional el pliegue característico de α/β-hidrolasa[15]. Asimismo, las cutinasas (EC 3.1.1.74) son serina hidrolasas que pertenecen a esta superfamilia[16,17]. A pesar de que tanto las lipasas como las esterasas pertenecen a la familia de las hidrolasas, presentan diferencias clave en su comportamiento frente a los sustratos. Las lipasas actúan principalmente sobre sustratos insolubles en agua, como los triglicéridos formados por ácidos grasos de cadena larga[15]. En cambio, las esterasas actúan sobre sustratos solubles[18] prefiriendo hidrolizar ésteres simples, como el acetato de etilo, y en general solo son activas sobre triglicéridos que contienen ácidos grasos con cadenas inferiores a seis carbonos[15]. Las esterasas, muestran una actividad típica de Michaelis-Menten, mientras que las lipasas requieren una concentración de sustrato crítica para activarse, formando agregados[18]. La especificidad que muestran estas enzimas hacia determinados compuestos es un factor crucial en cuanto a sus posibles aplicaciones industriales y biotecnológicas[19].

Finalmente, las cutinasas se consideran intermediarias entre las lipasas y las esterasas, ya que muestran características que pertenecen a ambas [20]. Poseen una tríada catalítica clásica Ser-His-Asp, en la que la serina catalítica está expuesta al disolvente, a diferencia de las lipasas que tienen una estructura secundaria o “tapa” hidrofóbica que cubre el sitio activo[16,20]. Por lo tanto el sitio activo de las cutinasas es lo suficientemente grande como para albergar la cutina, un sustrato de alto peso molecular[16]. Estas enzimas son capaces de hidrolizar ésteres solubles de bajo peso molecular, triglicéridos de cadena corta y larga, poliésteres naturales y sintéticos de alto peso molecular, y ceras. También catalizan reacciones de esterificación y transesterificación[16,20].

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico

Se utilizaron 27 cepas bacterianas, correspondientes a las especies de: *Serratia marcescens* (11), *Serratia nematodiphila* (3), *Serratia plymuthica* (2), *Serratia grimesii* (1), *Peribacillus simplex* (1), *Exiguobacterium mexicanum* (1), *Chryseobacterium oncorhynchi* (2), *Bacillus cereus* (2), *Lelliottia amnigena* (1), *Pseudomonas clororaphis* (2) y *Pseudomonas lundensis* (1). Estas cepas fueron previamente aisladas en vertederos de plástico en Mazamitla, Jalisco, así como cepas proporcionadas por la Universidad Autónoma de Nayarit, de Tepic, Nayarit, aisladas de un vertedero en San Blas. Las cepas fueron reactivadas en agar nutritivo (g/L): 23. Las placas fueron incubadas a 30°C durante 2 días.

Cribados en Agar con Diferentes Inductores

Se cultivaron las cepas en un medio compuesto por (g/L): triptona 10, extracto de levadura 5, agar 20, rodamina 0.001% p/v y emulsión de inductores 10. Los inductores utilizados fueron tributirina, aceite de oliva y aceite de linaza para evaluar la actividad esterasa, lipasa y cutinasa, respectivamente. Además, se utilizaron tres derivados del petróleo, aceite mineral, Triton X-100 y polietilenglicol (PEG), para analizar la capacidad de las cepas para utilizar estos compuestos. Las placas fueron incubadas a 30°C durante 4 días y el halo de degradación fue observado bajo luz blanca y ultravioleta (UV). Todas las cajas fueron fotografiadas y el tamaño de halo fue procesado utilizando el programa imageJ (versión 1.8, National Institutes of Health, Bethesda MD, USA). Las actividades enzimáticas se clasificaron de acuerdo con el tamaño del halo y la intensidad bajo luz UV. Para la clasificación de las cepas en cuanto a su intensidad bajo luz UV se consideraron los siguientes niveles: 0 intensidad nula, 1 intensidad baja; 2 intensidad media y 3 intensidad alta.

Cribados en Agar con Diferentes Polímeros

Se cultivaron las cepas en un medio mineral compuesto por (g/L): agar 14, K_2HPO_4 1, $(NH_4)_2SO_4$ 1, NaCl 1, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5, KH_2PO_4 0.2, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.002, $MnSO_4 \cdot H_2O$ 0.001, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.001, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.001 y plástico en polvo 0.1% p/v. Los plásticos evaluados fueron polietileno de baja densidad lineal (LDPE), tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad lineal (HDPE) y poliestireno (PS). Los plásticos en polvo fueron desinfectados durante 30 min en etanol al 70%, se secaron en campana de flujo laminar y puestos bajo luz UV durante 10 min. Las placas fueron incubadas a 30°C durante 2 semanas, al término de este periodo se observó el crecimiento de biomasa con ayuda de una tinción por inundación con azul de Coomassie 0.1 % p/v.

RESULTADOS

Se analizaron las 27 cepas bacterianas, correspondientes a las especies *S. marcescens*, *S. nematodiphila*, *S. plymuthica*, *S. grimesii*, *P. simplex*, *E. mexicanum*, *C. oncorhynchi*, *B. cereus*, *L. amnigena*, *P. clororaphis* y *P. lundensis*. Tras el periodo de incubación en los medios con inductor, se midieron los halos de degradación observados con luz blanca y bajo luz UV (Figura 1a y 1b). Asimismo, se registró la intensidad de los halos bajo luz UV (Figura 1c). Además, se cuantificaron las áreas de crecimiento de la biomasa (Figura 2) de cada una de las cepas en respuesta a cada uno de los inductores y tipos de plásticos utilizados como fuente de carbono.

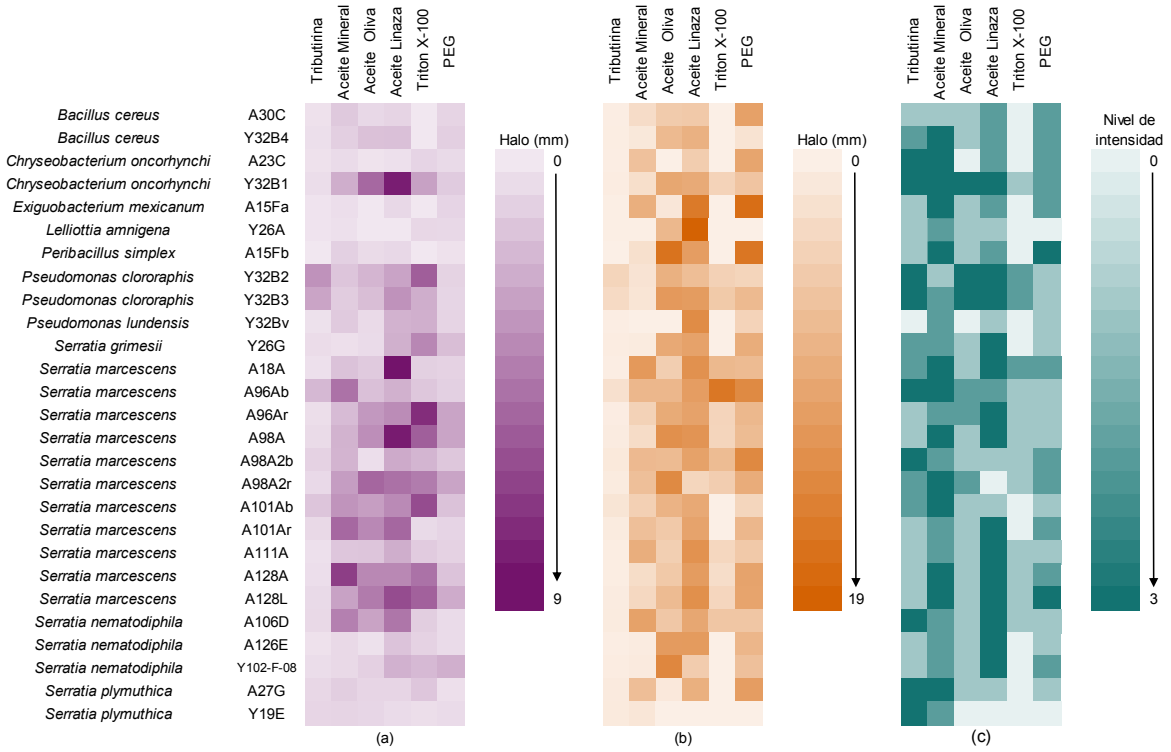


Figura 1. Halos de hidrólisis (mm) (a) luz blanca; (b) luz UV; (c) intensidad de halos bajo luz UV a 365 nm.

Al comparar la figura 1a y 1b se observan diferencias en las medidas de los halos bajo luz blanca como luz UV, posiblemente atribuibles a la percepción visual del halo en función de la fuente de iluminación.

A partir de la intensidad de los halos bajo la luz UV (figura 1c), se observó que el 63.6% de las cepas de *S. marcescens* presentó una fuerte actividad en aceite de linaza y una alta degradación de aceite mineral. El halo más extenso en actividad cutinasa, bajo la luz UV (figura 1b), se registró para la cepa A128L (12.9 mm) y en aceite mineral para la cepa A18A (11.67 mm). Por otro lado, bajo luz blanca (Figura 1a), se pudo apreciar el mayor halo de actividad cutinasa para las cepas A18A con 9.145 mm y A98A con 8.67 mm, mientras que la cepa A128A mostró el mayo halo en aceite mineral (7.21 mm).

En cuanto a otras cepas de *S. marcescens,* las cepas A96Ab y A98A2b presentaron una fuerte intensidad bajo luz UV en tributirina con halos, de 2.02 mm y 0.92 mm, respectivamente. En tanto, la cepa A128L manifiesta actividad en medio con PEG, aceite mineral y aceite de linaza, teniendo halos de hidrólisis más extensos en aceite de linaza bajo luz UV y luz blanca (12.9 mm y 6.61 mm, respectivamente, Figura 1a y 1b).

De forma general se observa que la mayoría de las cepas de *S. marcescens* tuvieron un mayor crecimiento de la biomasa (mm^2) en medio suplementado con aceite de linaza (Figura 2a), únicamente la cepa A98A2r tuvo mayor crecimiento en aceite de oliva y la cepa A101Ab en PEG. Además, *S. marcescens* mostró una amplia capacidad para crecer en PS, LDPE y HDPE (Figura 2b) con mayor actividad en aceites vegetales de cadena larga y derivados de petróleo líquidos. Se comprobó que las 11 cepas tienen diversidades metabólicas y perfiles enzimáticos distintos.

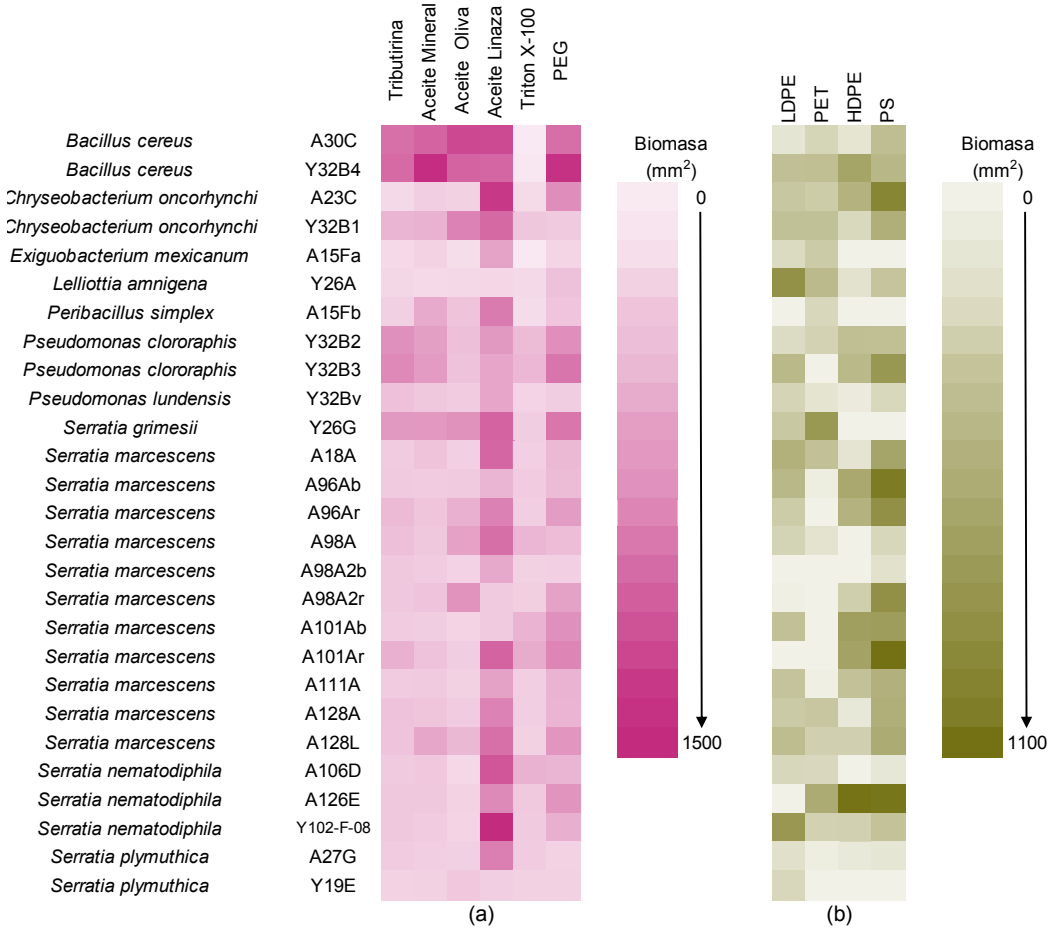


Figura 2. Crecimiento de biomasa (mm2) (a) medio con inductores; (b) en medio mineral con plásticos.

S. nematodiphila y *S. grimesii* presentaron una gran intensidad de halos para la actividad cutinasa (figura 1c) aunque la cepa A106D, también manifestó actividad esterasa, presentando los halos más extensos bajo luz UV en aceite de linaza de 11.43 mm (A126E) y 10.44 mm (Y26G), mientras que bajo luz blanca los mayores halos se presentaron en Triton X-100 de 4.09 mm (Y26G) y en aceite de linaza de 4.82 mm (A106D). Además, estas especies mostraron un mayor crecimiento de biomasa (mm^2) en aceite de linaza. En cambio, presentaron el mayor crecimiento de biomasa (mm2) en medios con diferentes plásticos: Y26G en PET, A106D y Y102-F-08 en LDPE y A126E en HDPE y PS. Estos resultados también evidencian una diversidad metabólica distinta entre cada una de las cepas.

S. nematodiphila y *S. grimesii* presentaron una gran intensidad de halos para la actividad cutinasa (Figura 1c) aunque la cepa A106D, también fue positiva en actividad esterasa. Los halos más extensos bajo luz UV fueron en aceite de linaza (11.43 mm, A126E; 10.44 mm,Y26G), mientras que bajo luz blanca los mayores halos se presentaron en Triton X-100 de 4.09 mm (Y26G) y en aceite de linaza de 4.82 mm (A106D). Además, estas especies mostraron un mayor crecimiento en aceite de linaza. En cambio, presentaron el mayor crecimiento de biomasa (mm2) en medios con diferentes plásticos: Y26G en PET, A106D y Y102-F-08 en LDPE y A126E en HDPE y PS. Estos resultados también evidencian una diversidad metabólica distinta entre cada una de las cepas.

S. plymuthica presentó actividad en tributirina y en aceite mineral por la intensidad de sus halos observados bajo luz UV (Figura 1c). La cepa A27G, mostró los halos más grandes bajo luz UV (Figura 1b) en PEG, aceite de linaza y aceite mineral, siendo mayores a los obtenidos con la cepa Y19E en todos los medios. Bajo la luz blanca (Figura 1a), los mayores halos se presentaron con la cepa A27G en Triton X-100 (1.4 mm) y en aceite mineral (1.08 mm). Los mayores crecimientos de biomasa (mm^2) para la cepa A27G se dieron en aceite de linaza y LDPE, mientras que para la cepa Y19E fue en aceite de oliva y LDPE. No obstante, estas cepas no se destacan contra otras especies de *Serratia.*

Destacaron las cepas de *C. oncorhynchi* por su alta actividad esterasa, cutinasa, lipasa y capacidad de degradación de aceite mineral identificada por la intensidad de halos bajo luz UV (Figura 1c). Se presentaron los halos más grandes, bajo luz UV (Figura 1b) en PEG (A23C, 10.1 mm) y en aceite de oliva (Y32B1, 9.8 mm), en cambio, bajo la luz blanca (Figura 1a) resaltan los halos presentados por la cepa Y32B1, con el halo más grande de 8.59 mm en aceite de linaza. El mayor crecimiento de la biomasa de ambas cepas se obtuvo con aceite de linaza y en medio con PS (Figura 2). La cepa Y32B1 expone una mayor actividad enzimática, aunque A23C presenta los mayores crecimientos en biomasa en medios con inductores y con plástico.

P. clororaphis (Y32B3) también mostró una alta actividad esterasa, lipasa y cutinasa por su intensidad bajo luz UV (Figura 1c), con halos de 2.85 mm, 11.61 mm y 11.27 mm, respectivamente, (Figura 1b). Bajo la luz blanca (Figura 1a) los mayores halos se obtuvieron con la cepa Y32B2 en Triton X-100 (5.84 mm) y tributirina (3.63 mm). Por otra parte, los mayores crecimientos se presenciaron en medios con PEG en ambas cepas por igual y en el caso de los plásticos el mayor crecimiento de Y32B2 fue en HDPE y para la cepa Y32B3 en PS. Esta especie también evidenció diferencias en la actividad enzimática entre cepas y su capacidad de crecimiento en distintos tipos de plástico.

B. cereus destacó por su gran crecimiento de biomasa en todos los inductores a excepción del Triton X-100 en el que no se presenció biomasa (Figura 2a). Por este gran crecimiento de las cepas los halos medidos bajo luz blanca y UV no destacan como otras especies. Sin embargo, por la intensidad de sus halos bajo luz UV (Figura 1c) la cepa Y32B4 destacó en actividad en aceite mineral y la cepa A30C en aceite de linaza y PEG. Por otro lado, Y32B4 tuvo un mayor crecimiento en medio con HDPE y A30C con PS (Figura 2b).

E. mexicanum por su parte tuvo gran intensidad de halo bajo luz UV (Figura 1c) en medio con aceite mineral, aunque el mayor halo presenciado bajo luz UV (Figura 1b) fue en PEG, mientras que bajo

luz blanca no destaca por sus halos en ningún medio. Además, presentó un mayor crecimiento en aceite de linaza y PET (Figura 2). Por su parte, *P. simplex* exhibió actividad en medios de aceite mineral y PEG por la intensidad de halo bajo la luz UV (figura 1c), teniendo halos, bajo luz UV (Figura 1b), similares en aceite de oliva (16.79 mm) y PEG (16.36 mm). El mayor crecimiento fue observado en aceite de linaza y PET (Figura 2).

P. lundensis y *L. amnigena* presentaron una intensidad media en aceite mineral bajo luz UV (Figura 1c) con sus halos más grandes en UV con en aceite de linaza (figura 1b). *P. lundensis* presentó un mayor crecimiento en aceite de linaza, aunque *L. amnigena* lo presentó en PEG (Figura 2a), y en medio con plásticos se evidenció un mayor crecimiento de ambas especies en LDPE (Figura 2b)

CONCLUSIONES

Los cribados realizados permitieron identificar la diversidad metabólica y enzimática entre especies presentes en suelos contaminados con plásticos. Se observó una notable variabilidad entre cepas de una misma especie, como *B. cereus*, *C. oncorhynchi*, *S. marcescens*, *S. nematodiphila* y *S. plymuthica*, en cuanto a los inductores que estimulan su mayor actividad enzimática y su crecimiento en medios con plásticos.

Algunas cepas mostraron alta actividad enzimática ante los inductores, pero un crecimiento limitado en medios plásticos. La cepa Y32B1 presentó halos grandes e intensos en medios con aceite de oliva y linaza, lo que indica buena actividad lipasa y cutinasa. No obstante, su crecimiento en medios con plásticos fue moderado. Esto sugiere que, aunque los inductores promueven la producción enzimática, estas enzimas podrían no ser capaces de degradar eficazmente los polímeros ensayados.

Por otro lado, se encontraron cepas con un crecimiento significativo en medios con plásticos, pero sin actividad enzimática detectable frente a los inductores utilizados. La cepa A126E representa este caso, lo que indica que podría poseer enzimas capaces de degradar plásticos que no fueron inducidas en este estudio. En consecuencia, se recomienda continuar investigando cepas con potencial específico en plásticos como: *Lelliottia amnigena* (Y26A) para LDPE, *Serratia grimesii* (Y26G) para PET, *S. nematodiphila* (A126E) para HDPE y *S. marcescens* (A101Ar, A96Ab) para PS.

Estos resultados sugieren que dichas especies poseen la maquinaria enzimática necesaria para la degradación de plásticos, lo que representa una oportunidad prometedora para el tratamiento biológico de suelos contaminados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A.R. Othman, H.A. Hasan, M.H. Muhamad, N. 'Izzati Ismail, and S.R.S. Abdullah, "Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review," Environ. Chem. Lett., Vol. 19, 4, 2021, pp. 3057–3073.
[2] M. Mandal, A. Roy, R. Popek, and A. Sarkar, "Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution,'" The Microbe, Vol., 3, 2024, 100072.
[3] S.T. Azeko, G.A. Etuk-Udo, O.S. Odusanya, K. Malatesta, N. Anuku, and W.O. Soboyejo, "Biodegradation of Linear Low Density Polyethylene by *Serratia marcescens* subsp. *marcescens* and its Cell Free Extracts," Waste Biomass Valor., Vol. 6, 6, 2015, pp. 1047–1057.
[4] A. Amobonye, P. Bhagwat, S. Singh, and S. Pillai, "Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes," Sci. Total Environ., Vol., 759, 2021, 143536.
[5] B. Posada Bustamante, "La degradación de los plásticos," Rev. Univ. EAFIT., Vol, 30, 94, 1994, pp. 67–86.
[6] A.K. Urbanek, W. Rymowicz, and A.M. Mirończuk, "Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats," Appl. Microbiol. Biotechnol., Vol. 102,18, 2018, pp. 7669–7678.
[7] H. Nadeem, K.B. Alia, F. Muneer, I. Rasul, M.H. Siddique, F. Azeem, and M. Zubair, "Isolation and identification of low-density polyethylene degrading novel bacterial strains," Arch. Microbiol., Vol., 203, 9, 2021, pp. 5417–5423.

[8] J. Jin, J. Arciszewski, K. Auclair, and Z. Jia, “Enzymatic polyethylene biorecycling: Confronting challenges and shaping the future,” J. Hazard. Mater., Vol. 460, 2023, 132449.
[9] J. Álvarez-Barragán, L. Domínguez-Malfavón, M. Vargas-Suárez, R. González-Hernández, G. Aguilar-Osorio, and H. Loza-Tavera, “Biodegradative Activities of Selected Environmental Fungi on a Polyester Polyurethane Varnish and Polyether Polyurethane Foams,” Appl. Environ. Microbiol., Vol. 82, 17, 2016, pp. 5225–5235.
[10] B.R. Kang, S.B. Kim, H.A. Song, and T.K. Lee, “Accelerating the Biodegradation of High-Density Polyethylene (HDPE) Using Bjerkandera adusta TBB-03 and Lignocellulose Substrates,” Microorganisms Vol. 7, 9, 2019, 304.
[11] J. Singh Jadaun, S. Bansal, A. Sonthalia, A.K. Rai, and S.P. Singh, “Biodegradation of plastics for sustainable environment,” Bioresour. Technol., Vol. 347, 2022, 126697.
[12] P. Lokesh, R. Shobika, S. Omer, M. Reddy, P. Saravanan, R. Rajeshkannan, V. Saravanan, and S. Venkatkumar, “Bioremediation of plastics by the help of microbial tool: A way for control of plastic pollution,” Sustain. Chem. Environ., Vol. 3, 2023, 100027.
[13] J. Ru, Y. Huo, and Y. Yang, “Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes,” Front. Microbiol., Vol. 11, 2020.
[14] A. Bendre, E. Shukla, and S. Gaikwad, “Hydrolases: The Most Diverse Class of Enzymes,” 2022.
[15] U.T. Bornscheuer, “Microbial carboxyl esterases: classification, properties and application in biocatalysis,” FEMS Microbiol. Rev., Vol. 26, 1, 2002, pp. 73–81.
[16] S. Chen, L. Su, J. Chen, and J. Wu, “Cutinase: Characteristics, preparation, and application,” Biotechnol. Adv., Vol. 31, 8, 2013, pp. 1754–1767.
[17] H. A. Rueda Rueda, C. A. Jimenez-Junca, R. E. Prieto Correa, “Cutinasas obtenidas de hongos filamentos: comparación de métodos de screening / Cutinases obtained from filamentous fungi: comparison of screening methods”, Dyna, Vol. 87, 214, 2020, pp. 183–190.
[18] H.W. Anthonsen, A. Baptista, F. Drabløs, P. Martel, S.B. Petersen, M. Sebastião, and L. Vaz, “Lipases and esterases: a review of their sequences, structure and evolution,” in Biotechnol. Annual Rev., 1995), pp. 315–371.
[19] C.D. Stemler, K.K. Lorenz, and K.A. Scherf, “Rhodamine B-based lipase activity assay with natural substrates—development and application,” Int. J. of Food Sci. Tech., Vol. 59, 2, 2024, pp. 1063–1070.
[20] A. Martínez, and S. Maicas, “Cutinases: Characteristics and Insights in Industrial Production,” Catalysts Vol. 11, 10, 2021, 1194 .

PERCEPCIÓN DE LOS PRODUCTORES SOBRE EL MANEJO DE LOS HERBICIDAS EN EL CULTIVO DE PIÑA

Ilse Pérez García[1], María del Refugio Castañeda Chavez[1], Juan Valente Megchún García[1], Araceli Isabel Amaro Espejo[1]

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río. Municipio de Boca del Río, Veracruz

ilsegraciia@gmail.com

RESUMEN

En los últimos 30 años, para mayor producción agrícola se manejan agroquímicos de manera excesiva provocando degradación en los suelos, causando pérdida de fauna edáfica y la disminución para obtener el equilibrio del suelo, ya que son las encargadas de regular los procesos naturales como lo son el ciclo del carbono, mineralización de nitrógeno y fósforo, porosidad del suelo y procesamientos de materia orgánica[1]. Los herbicidas químicos, son utilizados en las parcelas agrícolas, debido a que las plantas de piña crecen con malas hierbas, que compiten por nutrientes, luz, agua y la buena calidad de la fruta; por otra parte, la piña es considerada una de las frutas tropicales de mayor importancia económica, para el consumo nacional e internacional. Por lo anterior el objetivo de esta investigación es evaluar el impacto que han causado el uso de los herbicidas en el suelo en el cultivo de piña. El estudio se llevó a cabo en la localidad de los Robles, municipio de Medellín de Bravo en el estado de Veracruz, realizando una encuesta, con la estructuración de un cuestionario con preguntas abiertas y cerradas, las variables que se analizaron fueron el sexo, edad, escolaridad de los productores, el manejo y uso de los herbicidas, así como también el tipo de herbicida que utilizan, la información se analizó con el programa Excel 2013. Se encontró que los productores de piña, el 55.8% son hombres de 55 años de edad, el 37.55% cursa la educación primaria, casi todos los productores señalas que utilizan herbicidas (93.5%) y la mayor parte de ellos no cuenta con una capacitación para su uso (68:75%), utilizan los herbicidas cuyo ingrediente activo es el glifosato (80%), y la preparación la realiza con base a su experiencia (66.67%), la mayoría de los productores nota una resistencia en la malezas en cada aplicación (68.75%); Además, de que el 66.6% de los productores aplican los herbicidas ellos mismos, el 46.6% admite tener síntomas posteriores a la aplicación de los herbicidas químicos, aunque la frecuencia de aplicación en menor en época de lluvia, debido a que utilizan el plástico acolchado. Se concluye que los productores de piña en los Robles de Medellín de Bravo, no realizan un buen manejo de los herbicidas en el cultivo, además han observado que hay mayor resistencia de las malezas y un impacto negativo a la salud pública por el uso de los herbicidas, como el glifosato.

INTRODUCCIÓN

La piña (*Ananas comosus*) es originaria de Brasil y Paraguay, un poco antes de la llegada de los europeos a México fue introducida por los indígenas (Coppens d'Eeckenbrugge & Duval, 2009; Morton, 1987). El agradable sabor y aroma, así como su contenido en vitaminas A, B y C, hacen que el fruto de la piña sea altamente demandado en los diversos mercados (ASERCA, 2000). México ocupa entre el séptimo y el décimo lugar a escala mundial en producción de piña, con alrededor de 20 mil hectáreas sembradas por año, correspondientes a un millón de toneladas de fruta cosechada, y un rendimiento promedio de entre 45 y 55 t/ha. siendo Veracruz el principal productor (SIAP 2017). Un elemento primordial como lo es el suelo en el que evoluciona la vida es un tanto difícil de recuperar siendo este vulnerable hacia su explotación por lo que es considerado un recurso no renovable lo cual es más utilizado por la agricultura, ganadería, pastos, etc. Por lo que se puede contemplar que el suelo provee importantes funciones ambientales, en los que para las plantas de piña es el alimento primordial para su desarrollo (Dorronsoro 2007).

En un cultivo como lo es la piña las malezas son controladas por los herbicidas, las cuales retienen el 0.3% de los herbicidas aplicados, lo que nos indica que el 99.7% podría estar destinado al

ambiente perjudicando a los sistemas bióticos y abióticos ya que en suelo los herbicidas se comportan de manera diferente este puede absorberse o acumularse, adherirse, translocarse y biotransformarse, y puede suponer la pérdida de este, por lo que en los alimentos agropecuarios pueden absorber y acumular los herbicidas e impactar de manera negativa a la salud humana (Gutiérrez & Arregui, 2005; Lang Ovalle *et al*., 2010).

Los herbicidas tienen que ser manejados responsablemente; los productores o aquellas personas que hagan uso de los productos agroquímicos, necesitan cumplir con las normas, técnicas y leyes del manejo así, como el almacenamiento, aplicación, disposición de los envases una vez utilizados, de forma que se pueda asegurar la salud del trabajador, la salud del consumidor y la del equilibrio de los ecosistemas. El mal uso de herbicidas causa un impacto negativo al suelo y al realizarse malas prácticas, como aplicarlos de manera directa al suelo y su uso excesivo forman lixiviados que son afectados por el movimiento desmedido de los componentes químicos en el suelo, la durabilidad y acumulación de los herbicidas en suelos se ve influenciada por el tipo de suelo, si son arenosos o arcillosos (siendo los arcillosos más vulnerables a la retención, mientras que los arenosos infiltran el agua pudiendo llevar el herbicida hasta aguas subterráneas), la producción de materia orgánica que se encuentra presente en el suelo, las características descritas del herbicida que se implementa y la concentración excesiva del agua que se utiliza para el riego del cultivo o la lluvia (Hansen *et al*., 2013). Algunos de los herbicidas registrados en el mercado y más usados son paraquat, diquat, glifosato, atrazina en el caso de la persistencia se habla de que algunos herbicidas como lo son el glifosato y la atrazina pueden persistir desde meses hasta años en el suelo (Hansen *et al*., 2013). Uno de los herbicidas generalmente más usado en el mundo es el glifosato ya que este actúa inhibiendo la síntesis de aminoácidos aromáticos (Jaworski 1972). Varios estudios demuestran el daño e impacto ambiental en el manejo de glifosato, ya que en el suelo es adsorbido mediante uniones fosfato y degradado por microorganismos lo que ocasiona una poca movilidad de glifosato como del ácido aminometilfosfónico (AMPA), no obstante, a esto estudios de lixiviación y escurrimiento demuestran que puede introducirse hasta los más hondo del suelo incluso cuando se aplica previo a lluvias o tormentas intensas este llega a las aguas superficiales (Flury 1996; Villholth *et al*., 2000; Jaynes *et al.,* 2001; Petersen *et al.,* 2002; Rampoldi, 2007; Sasal *et al*., 2010). Por lo que en el cultivo de piña estos productos químicos provocan que el suelo y la actividad microbiológica que existe en él se dañe poco a poco; ya que no solo combaten a los plagas o malezas para las cuales se usa, si no también aquellas que ayudan y tienen un efecto positivo en la piña, dejando en riesgo su disposición para producir los nutrientes que el cultivo de piña necesita para su buen desarrollo (Quijandría *et al*., 1997). El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto que han causado el uso de los herbicidas en el suelo en el cultivo de piña.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y métodos:
El estudio se llevó a cabo en la localidad de los Robles, Municipio de Medellín de Bravo en el estado de Veracruz, donde sus coordenadas son: latitud 18°58'15"N y longitud 96°7'5"W.

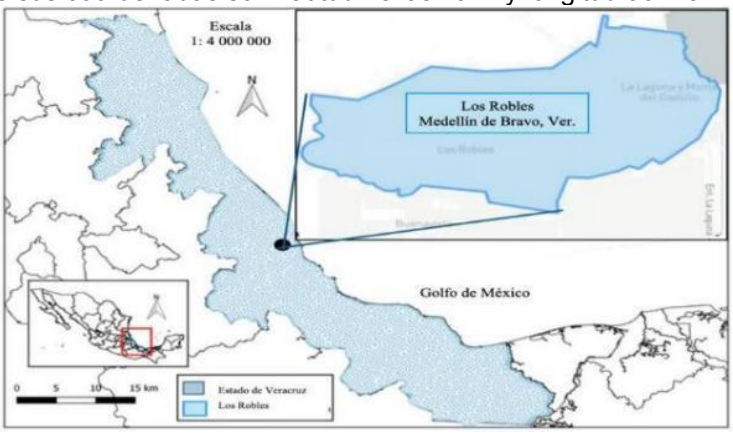


Figura 1: Ubicación de la localidad de los Robles del municipio de Medellín de Bravo, Ver.

El presente es un estudio descriptivo realizado entre los meses de septiembre y noviembre del año 2024 en la localidad de los Robles.

La investigación se desarrolló en tres etapas: 1) Platica con los productores donde se les dio a conocer el trabajo de investigación 2) Salidas a campo para la recolección de datos, 3) Análisis de los datos.

La primera etapa consistió en una visita a la localidad para conocer a los productores e identificar el uso y manejo que le dan a los herbicidas, en el cultivo de la piña.

La segunda etapa se llevó a cabo en campo con la finalidad de aplicar la encuesta que consta de un cuestionario de 30 preguntas previamente estructuradas con preguntas abiertas y cerradas.

Para la aplicación del cuestionario, se entrevistó a un total de 16 productores de piña, que es una muestra representativa, de la población de los productores de piña, debido a que se encuentran organizados por pequeños grupos de trabajo, los cuales fueron seleccionados mediante un método no probabilístico, de igual forma, el cuestionario tiene como variables de estudio identificar las malezas más comunes del cultivo de piña, los herbicidas más utilizados, el número de aplicaciones por año, las dosis utilizadas por aplicación y malestares que presenta el productor, los resultados fueron codificados en una base de datos de Excel 2013, y fueron analizados con la misma paquetería.

RESULTADOS

Se encontró que, de productores de piña, el 55.8% son hombres de 55 años de edad, (Figura 2) el 37.55% cursa la educación primaria (Figura 3).

El 93.5% de los productores reportaron que utilizan herbicidas de acción total, donde buscan la eliminación total de malezas en el cultivo de piña (Figura 4). El 80% de los productores confirmaron que utilizan agroquímicos, y su ingrediente activo es el glifosato(Figura 5), estos productos químicos tiene la sal isopropilamina que es la formulación más reconocida, la cual contiene componentes básicos: como son el ingrediente activo, un agente tenso-activo y agua (Giesy, Dobson, & Solomon, 2000), lo que puede causar una contaminación en aguas de escorrentía y superficiales, que al adsorber las partículas del suelo (Santos *et al*., 2008), esta biodisponible para aquellos organismos que se alimentan por filtración de sedimentos, por lo que en estudios anteriores se ha demostrado un riesgo de toxicidad a la salud humana, con efectos que se presentan a mediano o largo plazo por el mal uso y manejo de estos herbicidas (COFEPRIS,2016).

Debido al mal manejo de estos productos químicos el 68.75% de los productores nota una resistencia en las malezas por cada aplicación (Figura 4), siendo este un indicio de la presencia de malezas resistentes, por lo que actualmente se contabilizan 248 biotipos de malezas resistentes a glifosato, pertenecientes a 33 especies en 26 países en todos los continentes (Heap, 2016). Sin embargo, la frecuencia de aplicación en esta localidad es menor en época de lluvia, debido a que algunos productores de piña utilizan en sus cultivos el plástico acolchado.

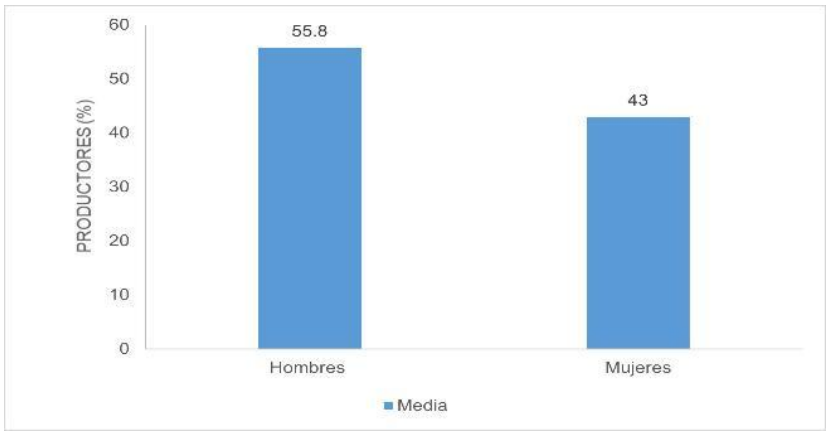


Figura 2: Edad y sexo de los productores de piña en la localidad de los Robles, Veracruz.

Donde el 100% de los encuestados se encontró que el 55.8% son hombres de 55 años de edad (Figura 2), lo que esta faceta social puede afectar directamente a la producción de piña ya que se requiere mucha mano de obra, y la edad puede llegar a ser una limitación en el desarrollo de las actividades (Ramírez, 2009).

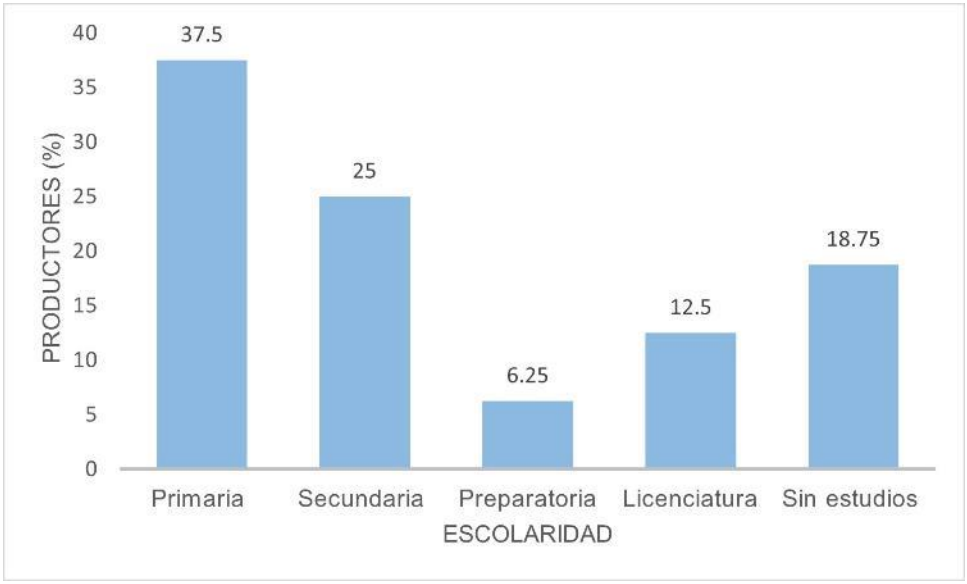


Figura 3: Escolaridad de los productores de piña en la localidad de los Robles, Veracruz.

Del 100% de los productores encuestados, el 37.55% curso la educación primaria, 25% la secundaria, el 12.5% obtuvieron la licenciatura, el 6.25% la preparatoria y el 18.85% no cuenta con ningún nivel académico. (Figura 3)

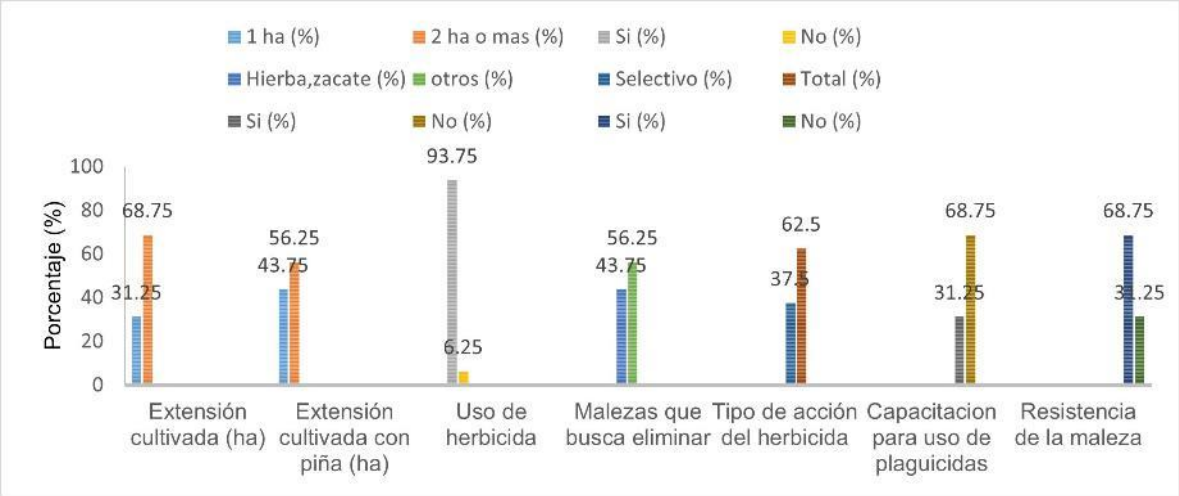


Figura 4: Aspectos más importantes del manejo agronómico del cultivo de piña que realizan los productores de piña en los Robles, Veracruz.

Del 100% el 68.75% cuenta con más de 2 ha de extensión de terreno, el 31.25% tiene menos de 1ha, el 56.25% es la extensión de más de 2 ha cultivada con piña, y el 43.45% menos de 1 ha, casi todos los productores señalan que utilizan herbicidas (93.5%), el cual el 62.5% utiliza de tipo de acción total, quienes el 56.25.% lo utiliza para eliminar malezas, el 68.75% ha notado una resistencia de estas y la mayor parte que representa el 68.75% de ellos no cuenta con una capacitación para su uso (Figura 4).

En México una de las actividades de mayor importancia es la agricultura, ya que esta contribuye a una alimentación nacional y ayuda a la economía (Vargas-González *et al*., 2019; Silveira-Gramont *et al*.,2018). Sin embargo, en México se puede reconocer uno de los mayores obstáculos sobre el manejo y utilización de productos químicos, es que se carece de una regulación y monitoreo ya que no existe información detallada sobre su uso y el catálogo de plaguicidas que fue publicado por Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) no registra en su totalidad los productos y los ingredientes activos (Arellano-Aguilar y Rendón, 2016) por lo que esta situación puede representar un riesgo ambiental para México.

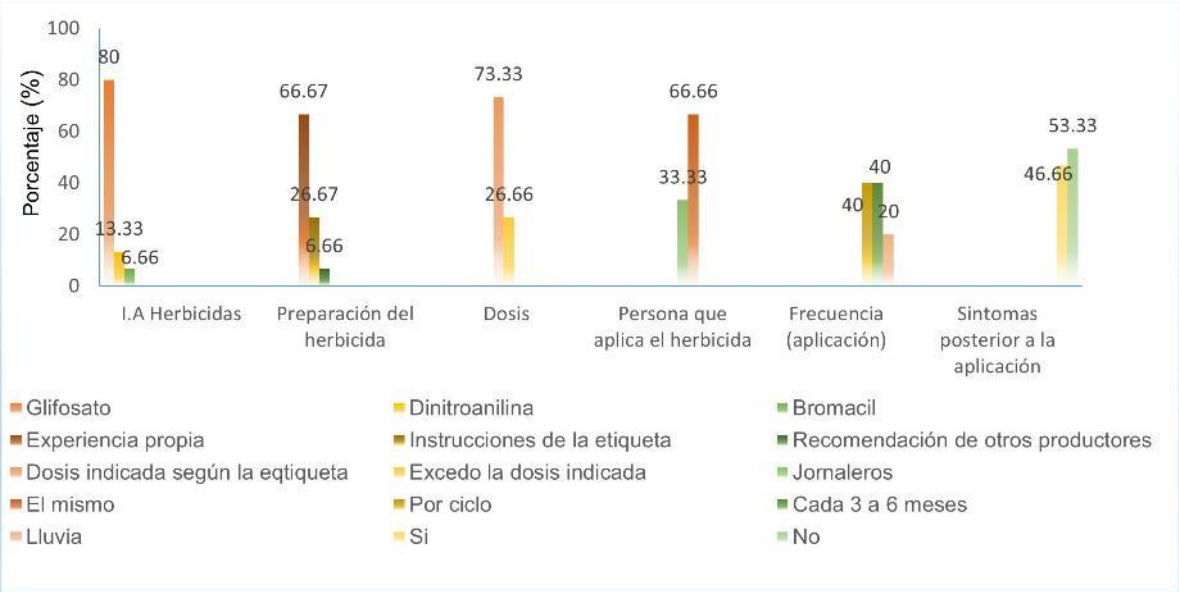


Figura 5: Manejo técnico de herbicidas que utilizan los productores de piña en los Robles, Veracruz.

Del 100% de los productores de piña utilizan los herbicidas cuyo ingrediente activo es el glifosato (80%), y la preparación la realiza con base a su experiencia (66.67%), la mayoría de los productores nota una resistencia en las malezas en cada aplicación (68.75%), además de que el 66.6% de los productores aplican los herbicidas ellos mismos, el 46.6% admite tener síntomas posteriores a la aplicación de los herbicidas químicos, aunque la frecuencia de aplicación es menor en época de lluvia, debido a que utilizan el plástico acolchado (Figura 5).

CONCLUSIONES

De los productores que fueron encuestados, la mayoría eran hombres y utilizan herbicidas para controlar las malezas del cultivo de piña, gran parte conocían el riesgo del manejo de los agroquímicos y aun así no usaban los elementos de protección personal o tenían precauciones después de tener contacto con éstos; determinando así, que no realizan un buen manejo de los herbicidas, por lo que también es importante concientizar a la población de que hay algunas otras alternativas para poder tener un cultivo de calidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASERCA. (2000, October). La Producción de Piña en México, Historia de un Patrimonio Regional. Claridades Agropecuarias, 3–41. Retrieved Retrieved from http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/086/ca086.pdf
2. Arellano-Aguilar, O. y Rendón von Osten, J., 2016. *La huella de los plaguicidas en México*. Greenpeace México A. C, México.
3. Cofepris (2016). Catalogo official de plaguicidas.
4. Coppens d'Eeckenbrugge, G., & Duval, M.-F. (2009). The Domestication of Pineapple: Context and Hypotheses. Pineapple News, 16, 15–27.
5. FLURY, M. 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soil. A review. J. Environ. Qual. 25:25-45.
6. Giesy, J. P., Dobson, S., & Solomon, K. R. (2000). Ecotoxicological risk assessment for Roundup® herbicide (pp. 35-120). Springer New York.
7. Hansen, A. M., Treviño Quintana, L., Márquez Pacheco, H., Villada Canela, M., Gonzáles Márquez, L., Guillen Garcés, R., & Hernández Antonio, A. (2013). Atrazina: un herbicida polémico. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 29, 65-84. Recuperado el 11 de abril de 2019, de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37028958004
8. Heap, I. (2016). Glycines Resistant Weeds. International Survey of Resistant Weeds. Recuperado de http://www.weedscience.org/Summary/UspeciesMOA.asp?lstMOAID=12
9. JAWORSKI, EG. 1972. Mode of action of nphosphonomethylglycine: Inhibition of aromatic amino acid biosynthesis. J. Agr. Food Chem. 20:1195-1205
10. RAMÍREZ, M.A. 2009. Diversidad florística y macrofauna edáfica en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas Tabasco. Tesis Maestría en Ciencias, Colegio de PostgraduadoCampus, Tabasco.86p.
11. Santos, L. D., Santos, J. B., Ferreira, F. A., Oliveira, J. A., Bentivenha, S., Machado, A. F. L. (2008). Exsudacao radicular de glyphosate por Brachairia decumbens e seus efeitos em plantas de eucalipto. Planta Daninha, 26(2).
12. Quijandría, G., Berrocal, J., & Pratt, L. (1997). La Industria de la Piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad. Centro Latinoamericano para la Sostenibilidad y el Desarrollo Sostenible, 7
13. SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (n.d.). Retrieved June 1, 2015, from http://www.gob.mx/siap/
14. Vargas-González, G., Alvarez-Reyna, V. P., Guigón López, C., Cano-Ríos, P., García-Carrillo, M., 2019. Impacto ambiental por uso de plaguicidas en tres áreas de producción de melón en la Comarca Lagunera, México. *CienciaUAT*, 13(2): 113-127. doi:10.29059/cienciauat. v13i2.1141.

USO DEL MÉTODO DE ASCENSO MÁS PRONUNCIADO PARA LA SELECCIÓN DE CONDICIONES DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNA DEL SUBPRODUCTO DE TOMATE

Laura Gabriela Espinosa Alonso[1], Sergio Medina Godoy[1], Esmeralda Margarita Sierra Gamboa[2], Rosa Luz Gómez Peraza[1], Marco Antonio Magallanes Tapia[1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Unidad Sinaloa, Departamento de Biotecnología. Guasave, Sinaloa. [2]Instituto Tecnológico de Los Mochis.
smedinam@ipn.mx.

RESUMEN

El procesamiento in del fruto de tomate para obtener jugo genera un subproducto rico en semillas y piel, el cual, tras la extracción de aceite, produce una harina con un contenido proteico atractivo. Este estudio busca caracterizar y optimizar la extracción de proteínas de este subproducto, promoviendo así una economía circular y sostenible. Inicialmente, se determinó el perfil de solubilidad de las proteínas utilizando buffers a diferentes pH. Se mezcló 0.1 g de subproducto seco y desengrasado con los buffers, y tras una hora de incubación, se cuantificó la proteína soluble mediante el ensayo colorimétrico de Bradford, adaptado para microplaca. Con los datos de máxima y mínima solubilización, se aplicó el método de ascenso más pronunciado para optimizar las condiciones de extracción de proteínas, empleando extracción alcalina seguida de precipitación isoeléctrica. Se utilizó un diseño factorial fraccionado para identificar las variables significativas en la extracción de proteínas. Se evaluaron cinco factores: relación sustrato:agua , tiempo de extracción alcalina, temperatura de extracción alcalina, pH de extracción y pH de precipitación. El rendimiento de proteína se expresó como mg de proteína por gramo de subproducto. A través del análisis de los datos, se obtuvo un modelo matemático que describe la extracción en función de los factores estudiados. Mediante el gráfico de Daniel Plot y el gráfico de Pareto, se identificaron y priorizaron los factores con mayor impacto en el rendimiento. Se encontró que el pH de precipitación es el factor más influyente, seguido por el pH de extracción, la interacción entre pH de extracción y temperatura, y el tiempo de extracción. La solubilidad mínima se observó a pH 4, mientras que la máxima se registró a pH 10. El análisis parcial fraccionado confirmó que el pH de precipitación es el factor más significativo, seguido por el pH de extracción y la interacción entre pH de extracción y temperatura. Utilizando la metodología de ascenso más pronunciado, se logró aumentar el rendimiento de extracción de proteínas en 19 veces. Estos resultados demuestran el potencial de aprovechamiento de este residuo agroindustrial para la extracción de proteínas con aplicaciones biotecnológicas, contribuyendo a la valorización de subproductos y a la sostenibilidad en la industria alimentaria.

INTRODUCCIÓN

El tomate industrial, especialmente cultivado para la elaboración de jugo y pasta, representa un componente clave en la agroindustria mexicana. Sinaloa destaca como uno de los principales estados productores, gracias a sus condiciones agroclimáticas y su infraestructura agrícola avanzada. Este cultivo no solo impulsa la economía regional, sino que también posiciona a México entre los principales exportadores mundiales de derivados del tomate.

La industria del procesamiento de tomate genera grandes volúmenes de subproductos, principalmente pieles y semillas, que comúnmente no son aprovechados, a pesar de su potencial como fuente de compuestos bioactivos. Entre estos, la proteína vegetal representa un componente de alto valor que puede ser extraído y utilizado en el desarrollo de alimentos funcionales. La recuperación de proteína a partir de estos residuos agroindustriales no solo contribuye a la sostenibilidad del sector alimentario, sino que también fortalece el enfoque de biorrefinería al transformar desechos en productos con valor agregado.

La optimización de los métodos de extracción, como el uso de solventes eutécticos profundos, tratamientos enzimáticos o tecnologías emergentes como ultrasonido y campos eléctricos pulsados, permite mejorar el rendimiento y la funcionalidad de las proteínas extraídas.[1] Este enfoque abre la posibilidad de incorporar estas proteínas en matrices alimentarias innovadoras, promoviendo alternativas sostenibles y nutritivas frente a las fuentes proteicas convencionales (Figura 1).

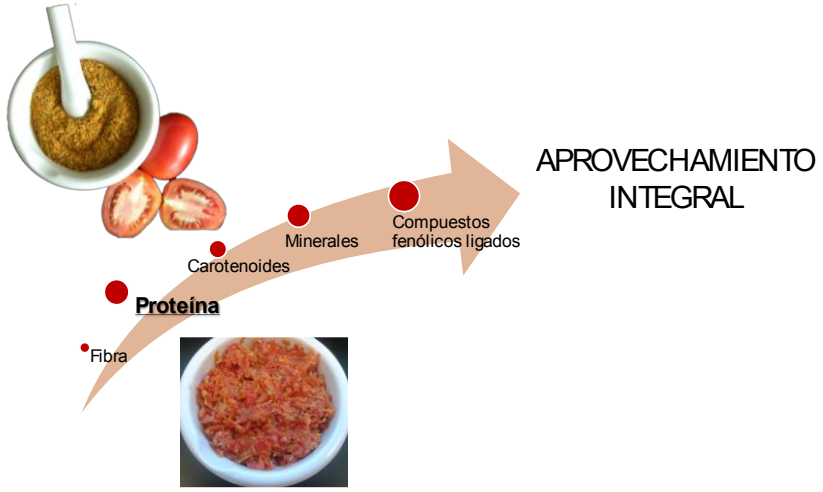


Figura 1. Aprovechamiento integral del subproducto de tomate.

TEORÍA

En la industria alimentaria y biotecnológica, la extracción de proteínas a partir de fuentes vegetales se realiza mediante diversos métodos que buscan maximizar el rendimiento y preservar la funcionalidad de las proteínas. Entre los procesos más utilizados se encuentran la extracción alcalina seguida de precipitación isoeléctrica, la extracción enzimática, la extracción asistida por ultrasonido, y la extracción con disolventes acuosos o salinos. Cada uno de estos métodos se selecciona en función de la naturaleza del material de origen, el tipo de proteína deseada y la aplicación final del producto.[2]

La extracción alcalina consiste en solubilizar las proteínas en soluciones con pH elevado (generalmente entre 8 y 11), lo que permite desnaturalizar las proteínas y liberarlas de la matriz vegetal. Posteriormente, se aplica la precipitación isoeléctrica, que implica ajustar el pH de la solución al punto isoeléctrico de las proteínas (usualmente entre pH 4 y 5), donde estas pierden su carga neta y precipitan fuera de la solución. Este método es ampliamente utilizado por su eficiencia, bajo costo y escalabilidad industrial, siendo común en el procesamiento de soya, chícharo y subproductos como los residuos del tomate.[3]

PARTE EXPERIMENTAL

Acondicionamiento de muestra. Se prepararon dos tipos de harina de subproducto de tomate (secada al horno y liofilizada), las cuales fueron desengrasadas con acetato de etilo. Posteriormente, se determinó los rangos de pH de mayor y menor solubilidad, en un rango de pH (2–10) utilizando soluciones buffer ajustadas con HCl, NaOH o H_3PO_4. Las muestras se sometieron a mezclado, ultrasonido y agitación orbital para favorecer la solubilización. Luego, se centrifugaron y se cuantificó la proteína soluble en el sobrenadante mediante el método de Bradford en placa de 96 pocillos, utilizando BSA como estándar y midiendo la absorbancia a 595 nm. Con lo anterior se determinó el pH de Extracción y pH de precipitación cercanos a la zona de optimización. Para determinar cuál de las siguientes variables del proceso de extracción de aislados proteínicos del subproducto agroindustrial son más importantes, se realizó un diseño factorial parcial, Indicando como variables de proceso el pH Alcalino, el pH Ácido, tiempo de extracción, relación sustrato agua y temperatura

empleando el paquete FrF2 de lenguaje R. Esta metodología permitió evaluar un gran número de variables con un diseño que implica pocos experimentos. En este caso se tuvieron 5 variables por lo que el diseño fue 2^{k-p}. Donde *k* son las variables y se manejó una *p* = 3 (resolución). Lo que generó el siguiente diseño (Cuadro 1).

Preparación de aislados proteicos isoeléctricos. Tras determinar el perfil de solubilidad, se seleccionó la harina secada al horno para la obtención de aislados proteicos. Se aplicó un diseño factorial parcial para evaluar el efecto de cinco variables: pH alcalino, pH ácido, tiempo de extracción, relación sólido-líquido y temperatura. La harina desengrasada se suspendió en agua desionizada y se ajustó el pH con NaOH (2N). Las suspensiones se prepararon y procesaron de acuerdo a las condiciones del Cuadro 2, se centrifugaron (4000 × g, 30 min) y el sobrenadante se acidificó con HCl para inducir la precipitación proteica (pH 3–8). Las muestras se refrigeraron a 4 °C durante la noche, se centrifugaron nuevamente y el precipitado se lavó, centrifugó y liofilizó (Figura 2). El aislado obtenido se cuantificó mediante el método de Bradford. [4]

Cuadro 1. Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones (tratamientos) de pH de extracción y pH de precipitación para la obtención de proteínas.

Corrida	pH Alcalino	pH Acido	Temperatura	Tiempo	Sustrato-agua
1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1
5	-1	-1	-1	1	1
6	-1	-1	1	1	-1
7	1	-1	-1	-1	-1
8	1	-1	1	-1	1

Diseño de composición con 5 factores; 8 tratamientos. No corresponde al orden de corrida.

Cuadro 2. Variables del proceso del diseño factorial parcial.

Factores	"-1"	"+1"
pH Alcalino	9	11
pH Ácido	4	6
Temperatura	25	60
Tiempo	60	180
Sustrato-agua	0.016	0.03

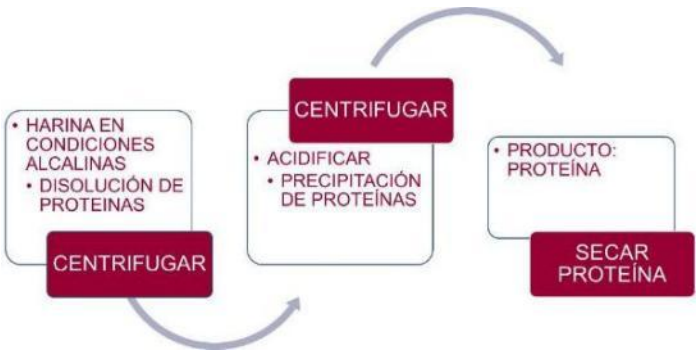


Figura 2. Preparación de aislados proteicos isoeléctricos:

RESULTADOS

Perfil de solubilidad. Se observó un perfil de solubilidad proteica distinto entre las harinas secadas por liofilización y por horno (Figura 3). En ambos casos, la solubilidad fue mayor en condiciones alcalinas. La muestra liofilizada presentó un mínimo de solubilidad en pH 4, lo cual es consistente con el punto isoeléctrico típico de proteínas de reserva de semilla, además de mostrar la típica curva "U" de solubilidad, con el mínimo entre valores de pH 4 a 5. [5] En contraste, la muestra secada al horno mostró su mínimo en pH 2, lo que podría atribuirse a modificaciones estructurales inducidas por el tratamiento térmico, que suelen asociarse a curvas distorsionadas de solubilidad[6]

.

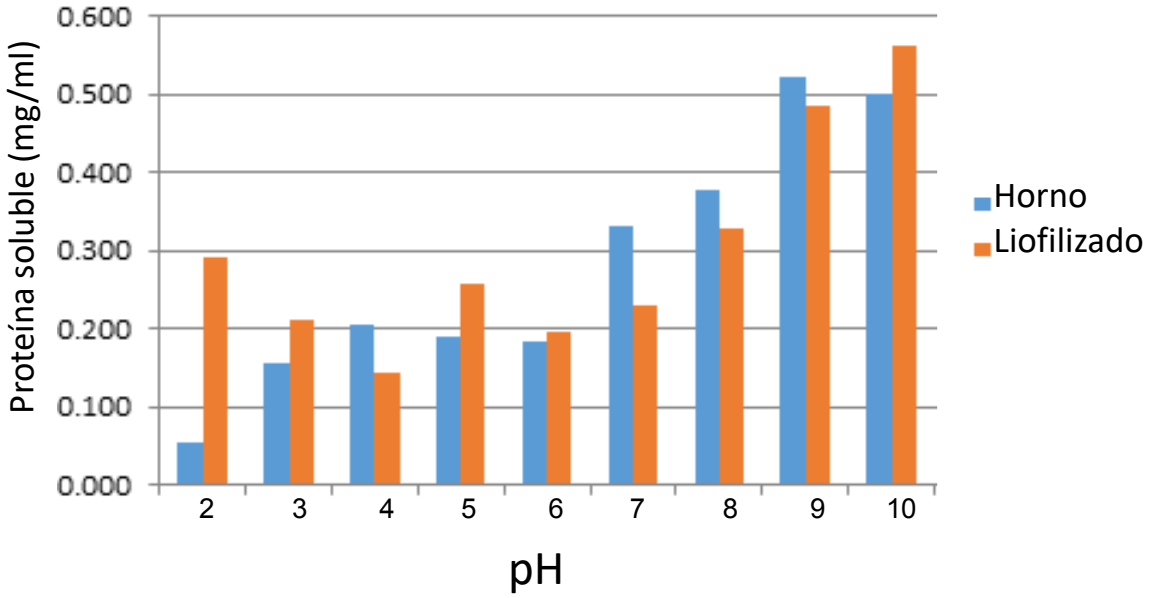


Figura 3. Curva de solubilidad de proteína de subproducto de tomate secado al horno vs liofilizado

Efecto de los variables de proceso Se observó que los principales factores positivos del proceso de extracción de concentrados proteínas es el pH Alcalino, seguido de temperatura y la relación sustrato:agua, siendo negativamente el tiempo y la interacción tiempo:pH ácido (Figura 4).

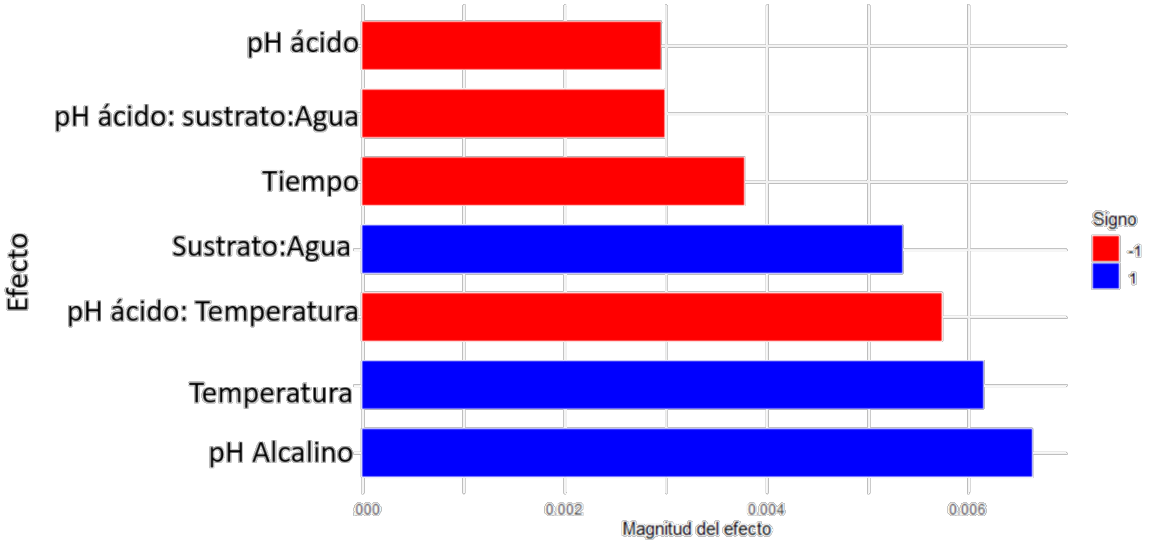


Figura 4. Efecto de las variables de proceso sobre el rendimiento de proteína.

Máximo ascenso. Con la determinación de impacto de las variables de proceso sobre la extracción de proteínas se construyó el experimento de Máximo ascenso, para lograr las condiciones cercanas al optimo. Se logró en el paso 4 la extracción, donde se obtuvo una mayor cantidad de proteína por harina empleada, que corresponde a pH Alcalino: 11.10, pH ácido 3.5, Temperatura 65 °C, y 65 minutos de extracción.

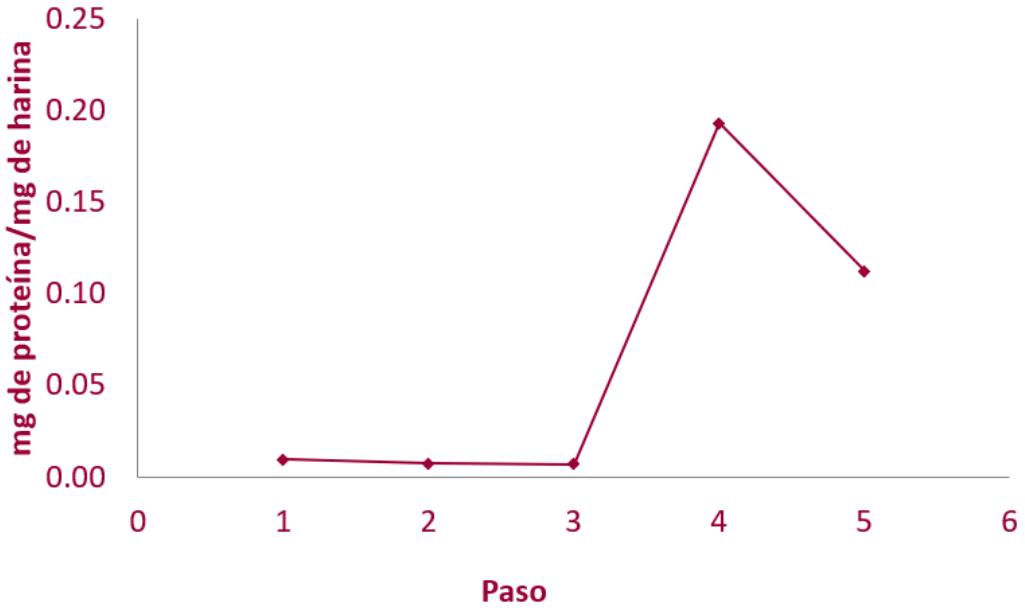


Figura 5. Experimento de máximo ascenso.

CONCLUSIONES

Para lograr el aprovechamiento del subproducto de tomate se caracterizaron dos métodos de secado del subproducto de tomate. Se observaron dos patrones de solubilización, donde el método por liofilización es convencional a lo reportado en forma U, mientras que el secado en horno (con temperatura), no se observa, pero si los mínimos y máximos. También se logró encontrar las condiciones cercanas al optimo empleando la estrategia de máximo ascenso, combinada con el perfil de solubilización y el diseño parcial fraccionado.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. J. Hernández-Álvarez, M. Mondor, and M. G. Nosworthy, Green Protein Processing Technologies from Plants: Novel Extraction and Purification Methods for Product Development. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-16968-7.
2. A. León-Villanueva et al., “Chemical and functional characterization of major protein fractions extracted from nontoxic Jatropha curcas byproduct meals,” JAOCS, Journal of the American Oil Chemists’ Society, vol. 99, no. 6, pp. 511–523, 2022, doi: 10.1002/aocs.12581.
3. A. Ashok N. and M. Sontakke, “Comparative analysis of extraction methods, proximate composition, and physicochemical and functional properties of fruit seed proteins: A comprehensive review,” Dec. 01, 2023, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/efd2.117.
4. M. M. Bradford, “A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding,” Anal Biochem, vol. 72, no. 1–2, pp. 248–254, May 1976, doi: 10.1016/0003-2697(76)90527-3.
5. N. T. T. Ngo and F. Shahidi, “Functional properties of protein isolates from camelina (Camelina sativa (L.) Crantz) and flixweed (sophia, Descurainis sophia L.) seed meals,” Food Production, Processing and Nutrition, vol. 3, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s43014-021-00076-8.
6. J. Yang et al., “The impact of heating and freeze or spray drying on the interface and foam stabilising properties of pea protein extracts: Explained by aggregation and protein composition,” Food Hydrocoll, vol. 133, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107913.

DESARROLLO DE APÓSITOS BIOCOMPATIBLES A BASE DE CELULOSA BACTERIANA PARA APLICACIONES TERAPÉUTICAS

Rafael Contreras Chavez[1], Ma. Guadalupe Garnica Romo[2], Héctor Eduardo Martínez Flores[1].

[1]Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
[2]Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
gromar05@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es el desarrollo de apósitos a base de celulosa bacteriana, obtenida por fermentación del té Kombucha, para su aplicación como sistema de administración de antibióticos. La celulosa bacteriana, derivada del cultivo simbiótico entre bacterias y levaduras (SCOBY), presenta características como alta resistencia mecánica, elevada cristalinidad, pureza, capacidad de retención de agua y biocompatibilidad[1], atributos que la posicionan como un biomaterial prometedor para la fabricación de apósitos. La metodología consistió en la optimización del proceso de fermentación del té Kombucha, considerando como variables de respuesta el grado de hinchamiento, la permeabilidad al vapor de agua (PVA), la resistencia a la tracción y la elongación. Posteriormente, se prepararon cuatro formulaciones de apósitos incorporando diversos dispersantes y aditivos como carboximetilcelulosa, quitosano, alginato, propilenglicol y colágeno. Las propiedades físicas, mecánicas y funcionales de los apósitos fueron evaluadas, incluyendo solubilidad, hinchamiento, resistencia a la tracción, elongación y permeabilidad al vapor de agua. Asi mismo, los apósitos fueron cargados con 30 µg de cefotaxima y 5 µg de ciprofloxacino, y se evaluó su capacidad antibacteriana. Los resultados mostraron que la variación en las concentraciones de los materiales utilizados generó diferencias significativas en las propiedades de los apósitos. En particular, la inclusión de colágeno mejoró la resistencia a la tracción, pero redujo la elongación, mientras que los apósitos con quitosano o alginato presentaron mejores propiedades mecánicas, pero menor resistencia a la tracción. Además, los apósitos demostraron un notable potencial antibacteriano frente a cepas patógenas como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*, evidenciando su capacidad para absorber, retener y liberar los antibióticos de manera eficaz. Estos hallazgos sugieren que los apósitos desarrollados tienen un gran potencial para aplicaciones biomédicas.

INTRODUCCIÓN

Los apósitos representan una herramienta fundamental en la medicina moderna para la protección y tratamiento de heridas, y su desarrollo ha evolucionado de materiales rudimentarios hacia sistemas complejos diseñados con biomateriales funcionales. Tradicionalmente fabricados con textiles naturales, el avance de la ciencia de materiales ha permitido la incorporación de polímeros de origen natural y sintético con propiedades específicas que favorecen los procesos de cicatrización y regeneración tisular[2]. En particular, materiales como el quitosano, la celulosa, el almidón, los alginatos, el colágeno y la gelatina destacan por su biocompatibilidad, biodegradabilidad, bajo costo y disponibilidad, lo que los posiciona como alternativas sostenibles frente a los polímeros sintéticos que predominan en el mercado actual[3].

Dentro de esta gama de biopolímeros, la celulosa ha cobrado gran relevancia por su estructura fibrilar, propiedades mecánicas y estabilidad química. Aunque su fuente más común ha sido la vegetal, recientemente se ha intensificado la investigación en torno a la celulosa bacteriana, un biopolímero producido principalmente por bacterias del género *Gluconacetobacter*, a partir de la fermentación de azúcares en presencia de un cultivo simbiótico de bacterias y levaduras (SCOBY, por sus siglas en inglés). Este cultivo se emplea comúnmente en la producción de kombucha, una bebida fermentada elaborada con té negro o verde endulzado, cuya fermentación origina una matriz de celulosa bacteriana con características físico-químicas únicas[1].

La celulosa bacteriana presenta una red tridimensional de microfibrillas entrelazadas con alta cristalinidad, elevada pureza, excelente capacidad de retención de agua y notables propiedades mecánicas. Estas características la convierten en un material idóneo para aplicaciones biomédicas, especialmente como soporte para la administración de fármacos o compuestos bioactivos. A diferencia de la celulosa vegetal, su estructura altamente porosa y libre de lignina o hemicelulosa reduce el riesgo de reacciones adversas, permitiendo su aplicación directa sobre tejidos humanos[1]. En este sentido, el desarrollo de sistemas alternativos de liberación tópica de compuestos con actividad antibacteriana representa una estrategia prometedora para mejorar la atención médica y reducir el impacto ambiental derivado del uso de materiales sintéticos.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un apósito a base de celulosa bacteriana obtenida a partir de la fermentación de té kombucha, con la finalidad de emplearlo como sistema de liberación tópica de antibioticos como alternativa a los esfuerzos por incorporar biomateriales de origen natural en la fabricación de dispositivos médicos sostenibles y funcionales.

TEORÍA

La búsqueda de materiales avanzados para aplicaciones biomédicas ha experimentado un auge significativo en las últimas décadas, con un enfoque particular en aquellos que ofrecen biocompatibilidad, bioactividad y sostenibilidad. En este contexto, la celulosa bacteriana (CB) ha emergido como un biomaterial prometedor con un potencial considerable en el campo de la ingeniería de tejidos y, específicamente, en el desarrollo de apósitos para la curación de heridas y otras aplicaciones terapéuticas[4]. Su singular estructura nanofibrilar tridimensional, alta pureza, notable capacidad de retención de agua y excelentes propiedades mecánicas la distinguen de la celulosa vegetal y otros polímeros convencionales[5].

La celulosa bacteriana es un exopolisacárido producido por diversas especies de bacterias, siendo *Komagataeibacter xylinus* (anteriormente *Gluconacetobacter xylinus*) el microorganismo más estudiado y utilizado para su síntesis[6]. A diferencia de la celulosa vegetal, la CB se obtiene como una membrana gelatinosa altamente hidratada, libre de lignina, hemicelulosa y pectinas, lo que simplifica su purificación y reduce el riesgo de respuestas inmunogénicas[7]. Esta pureza intrínseca es un factor importante para su aplicación en el ámbito médico, donde la biocompatibilidad es un requisito fundamental.

Uno de los aspectos más destacados de la CB es su biocompatibilidad inherente. Estudios *in vitro* e *in vivo* han demostrado que la CB presenta una baja toxicidad y no induce respuestas inflamatorias significativas, facilitando la adhesión, proliferación y diferenciación celular[8]. Esta característica la convierte en un candidato ideal para interactuar con tejidos biológicos sin provocar rechazo o efectos adversos, un pilar fundamental para el desarrollo de apósitos que promuevan la regeneración tisular. La estructura nanofibrilar de la CB, compuesta por una red de nanofibrillas de celulosa con diámetros que oscilan entre 20 y 100 nm, mimetiza la arquitectura de la matriz extracelular (MEC) de diversos tejidos[9]. Esta similitud estructural es ventajosa para la ingeniería de tejidos, ya que proporciona un andamiaje adecuado para el crecimiento celular y la formación de nuevo tejido. Además, la alta porosidad de la CB permite el intercambio eficiente de gases y nutrientes, esencial para mantener la viabilidad celular y promover la cicatrización de heridas[10].

La excepcional capacidad de retención de agua de la celulosa bacteriana, que puede superar el 99% de su peso, contribuye a mantener un ambiente húmedo en la herida, lo cual es reconocido como un factor clave para acelerar el proceso de cicatrización[11]. Un entorno húmedo previene la deshidratación de la herida, facilita la migración celular, promueve la angiogénesis y reduce la formación de costras y cicatrices[12]. Los apósitos a base de CB pueden, por lo tanto, proporcionar este ambiente óptimo, mejorando significativamente la calidad y velocidad de la curación.

Desde el punto de vista mecánico, la CB en estado húmedo exhibe una notable flexibilidad y adaptabilidad a los contornos del cuerpo, mientras que en estado seco puede presentar una alta resistencia a la tracción[13]. Estas propiedades son deseables para los apósitos, ya que aseguran la

integridad estructural durante su manipulación y uso, al tiempo que ofrecen confort al paciente. Además, la CB puede ser modificada mediante diversos tratamientos físicos o químicos para modular sus propiedades mecánicas y adaptarlas a aplicaciones específicas.

En el contexto de aplicaciones terapéuticas, la CB no solo actúa como una barrera física protectora, sino que también puede funcionar como un sistema de liberación de fármacos. Su estructura porosa permite la carga de diversos agentes terapéuticos, como antimicrobianos, antiinflamatorios, factores de crecimiento o analgésicos, que pueden ser liberados de manera controlada en el sitio de la herida. Esta capacidad de funcionalización amplía enormemente el espectro de aplicaciones de los apósitos de CB, permitiendo un tratamiento localizado y más eficaz.

La investigación actual se centra en optimizar los procesos de producción de CB, mejorar sus propiedades mediante modificaciones físicas y químicas, y explorar su potencial en combinación con otras biomoléculas o nanomateriales para desarrollar apósitos bioactivos con funcionalidades avanzadas[8]. El desarrollo de apósitos biocompatibles a base de CB representa una vía prometedora para abordar diversos desafíos en el cuidado de heridas y otras aplicaciones terapéuticas, ofreciendo soluciones innovadoras y sostenibles en el campo de la biomedicina.

PARTE EXPERIMENTAL

Producción de celulosa bacteriana

La celulosa bacteriana se obtuvo mediante la fermentación de una infusión azucarada con *SCOBY* y té previamente fermentado, en condiciones controladas de higiene y temperatura ambiente durante 15 días. Posteriormente, se recolectó la biomasa generada en la superficie y se reservó para su procesamiento.

Procesamiento y purificación

La biomasa fue triturada y sometida a una etapa de preacondicionamiento con agua caliente, seguida de un tratamiento alcalino con NaOH al 5% (p/v) a 90 °C durante 60 min. Luego, se aplicó una etapa de blanqueamiento con una solución oxidante mixta a 60 °C durante 24 h. El material resultante fue lavado hasta alcanzar pH neutro y secado en horno a baja temperatura con circulación de aire.

Elaboración de apósitos

Las fibras purificadas fueron suspendidas en medio acuoso y formuladas con una solución que incluyó un agente antimicrobiano conservante, un plastificante y un soporte estructural. Esta mezcla fue homogeneizada bajo agitación y enriquecida con colágeno. La mezcla final se vertió en moldes de acrílico y se secó a baja temperatura bajo flujo de aire, generando apósitos flexibles de composición definida.

Evaluación antibacteriana

Se evaluó la actividad antibacteriana mediante el método de difusión en agar frente a *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 y *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853. Los apósitos fueron comparados con discos impregnados con antibióticos estándar. Las zonas de inhibición se midieron tras 24 h de incubación a 37 °C en medio Müeller-Hinton, utilizando controles positivos y negativos.

Caracterización de los apósitos

Solubilidad y grado de hinchamiento

Se cortaron fragmentos de 1 cm² y se llevaron a peso constante a 105 ± 1 °C por 24 h para obtener el peso seco inicial (w_i). Posteriormente, se sumergieron en 20 mL de agua destilada a 25 °C durante 24 h, y se secaron nuevamente para determinar el peso final (w_f). La solubilidad se calculó como:

$$\%\,\boldsymbol{Solubilidad} = \frac{\boldsymbol{w_i - w_f}}{\boldsymbol{w_i}} \times \mathbf{100}\ (\boldsymbol{Ecuación\ 1})$$

Para el grado de hinchamiento, se midieron los pesos antes (W_1) y después (W_2) de sumergir las muestras en 50 mL de agua destilada por 24 h a 25 °C. Luego de secar superficialmente, se calculó:

$$\textbf{Grado de hinchamiento}\ (\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} x\ 100\ (\textbf{Ecuación 2})$$

Permeabilidad al vapor de agua (WVP)
Se evaluó según el método ASTM D885–02, con modificaciones. Se cubrieron frascos plásticos (diámetro 25.4 mm) con las películas, conteniendo 5 g de cloruro de calcio. Se colocaron en un desecador a 25 °C y 55 ± 3 % de HR. Se registró el cambio de peso durante 24 h.
La tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) se obtuvo mediante regresión lineal, y el WVP se calculó así:

$$WVP = \frac{WVPRT - tm}{\Delta p} \times 100\ (\textbf{Ecuación 3})$$

Donde *tm* es el espesor promedio y Δp es la diferencia de presión parcial de vapor de agua.

Propiedades mecánicas
Se utilizaron tiras de 10 mm de ancho por 50 mm de largo, evaluadas con un texturómetro con distancia de agarre de 30 mm y velocidad de 0.5 mm/s, según norma ASTM D882-02. Se midieron tres réplicas por formulación. La resistencia a la tracción (TS) se calculó como:

$$TS = \frac{Fm}{A}\ (\textbf{Ecuación 4})$$

Donde F_m es la fuerza máxima (N) y A el área de la sección transversal (mm²). La elongación se calculó como:

$$\%\textbf{Elongación} = \frac{(do - df)}{do} \times 100\ (\textbf{Ecuación 5})$$

Donde d_o es la distancia inicial y d_f la distancia a la rotura.

RESULTADOS

Durante el presente estudio se logró la obtención y purificación exitosa de celulosa bacteriana a partir de cultivos fermentativos. Este biopolímero producido por microorganismos fue aislado tras un proceso de fermentación estática, seguido de una etapa de purificación que permitió remover restos del medio de cultivo y compuestos residuales. Como resultado se obtuvo un material con las características físicas y visuales propias de una celulosa de alta pureza.

En la Figura 1 se presenta el aspecto macroscópico del gel de celulosa bacteriana. El material muestra una estructura translúcida, uniforme y sin presencia de contaminantes visibles, lo que sugiere una purificación eficiente.

Figura 1. Gel de celulosa bacteriana obtenido y purificado.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización físico-mecánica y funcional de los diferentes prototipos de apósitos elaborados con celulosa bacteriana, colágeno en diferentes concentraciones y distintos polímeros acompañantes como CMC, quitosano y alginato. La formulación 1, correspondiente a una mezcla con alta concentración de colágeno, no fue incluida debido a que dicha proporción impedía la formación estructural del apósito, resultando en una matriz inestable y altamente sensible a la humedad, lo que limitó su manipulación y análisis.

Los resultados muestran que la permeabilidad al vapor de agua (PVA) fue significativamente mayor en el prototipo 6 (colágeno***, alginato), alcanzando un valor de 13.12 g/msMPa, seguido por el prototipo 5 (colágeno***, quitosano) con 6.07 g/msMPa. Estas diferencias pueden atribuirse a la estructura porosa y la hidrofilicidad del alginato, que favorece el intercambio de humedad, lo cual es deseable para mantener un ambiente húmedo en la zona de la herida[14]. En contraste, las formulaciones 3 y 4 con menor concentración de colágeno presentaron las PVA más bajas, lo que sugiere una mayor densidad estructural que dificulta el paso del vapor de agua.

En cuanto a la resistencia a la tracción (FT), el prototipo 4 (colágeno*, CMC) mostró el valor más alto con 8.86 ± 0.8 MPa, lo cual indica que, a pesar de tener menor concentración de colágeno, la red polimérica fue más robusta posiblemente por una mejor interacción entre las cadenas de CMC y la matriz de celulosa. Este resultado sugiere que una menor proporción de colágeno podría favorecer la integridad mecánica del apósito al evitar la saturación de enlaces débiles o puntos de ruptura prematuros. Por el contrario, el prototipo 6 (colágeno***, alginato) tuvo la menor FT con 1.16 ± 0.1 MPa, lo cual podría deberse a la baja cohesión entre la matriz de colágeno y alginato bajo las condiciones de secado empleadas.

Respecto a la elongación (E), el prototipo 2 (colágeno***, CMC) presentó el mayor porcentaje (30.09 ± 1.4%), lo que podría relacionarse con una mayor plasticidad inducida por la cantidad de colágeno disponible y la compatibilidad con el CMC. A medida que la concentración de colágeno disminuyó (prototipos 3 y 4), también lo hizo la elongación, lo cual sugiere una relación directa entre el contenido de colágeno y la flexibilidad de la película.

La solubilidad fue más alta en el prototipo 6 (90.96 ± 1.2%), indicando una menor estabilidad en medios acuosos, lo cual puede comprometer la integridad del apósito durante su aplicación. Por el contrario, el prototipo 5 (colágeno*, quitosano) mostró la menor solubilidad (69.02 ± 1.5%), probablemente debido a las interacciones entre grupos amino del quitosano y grupos carboxilo de la celulosa y el colágeno, que generan una red más insoluble.

Los datos de hinchamiento muestran una tendencia interesante: el prototipo 4 (colágeno*, CMC) tuvo el mayor grado de hinchamiento (3305.14 ± 25.4%), lo cual puede estar asociado a una mayor exposición de grupos hidrofílicos en ausencia de exceso de colágeno, permitiendo una absorción de agua más eficiente. En cambio, el prototipo 5 (colágeno*, quitosano) mostró el menor hinchamiento (226.4 ± 1.0%), lo cual sugiere una estructura más compacta y reticulada que limita la entrada de

agua. Finalmente, estos resultados evidencian que la concentración de colágeno y el tipo de polímero acompañante influyen significativamente en las propiedades funcionales del apósito.

Tabla 3.Caracterización de prototipos.

Prototipos	PVA (g/msMPa)	FT (MPa)	E (%)	Solubilidad	Hinchamiento
1 (Colágeno****, CMC)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2 (Colágeno***, CMC)	4.50 ± 0.34^{C}	4.29 ± 0.14^{B}	30.09 ± 1.4^{A}	81.97 ± 0.8^{B}	789.73 ± 11.7^{C}
3 (Colágeno**, CMC)	2.38 ± 0.2^{D}	3.2 ± 0.7^{B}	11.9 ± 0.8^{B}	73.45 ± 2.9^{C}	1551.68 ± 141.8^{B}
4 (Colágeno*, CMC)	2.19 ± 0.1^{D}	8.86 ± 0.8^{A}	10.1 ± 1.5^{B}	75.91 ± 0.8^{C}	3305.14 ± 25.4^{A}
5 (Colágeno***, quitosano)	6.07 ± 0.5^{B}	2.99 ± 0.2^{B}	12 ± 1.2^{B}	69.02 ± 1.5^{D}	226 ± 4.1^{D}
6 (Colágeno***, alginato)	13.12 ± 0.2^{A}	1.16 ± 0.1^{C}	10 ± 1.4^{B}	90.96 ± 1.2^{A}	710.99 ± 40^{C}

Números indican la formulación. CMC, carboximetilcelulosa. Los asteriscos (*) indican la concentración del material. PVA, permeabilidad al vapor de agua. FT, fuerza de tensión. E, elongación.

La capacidad antibacteriana de los diferentes prototipos de apósitos cargados con ciprofloxacino (5 µg) y cefotaxima (30 µg) se evaluó contra las cepas bacterianas *Escherichia coli ATCC 25922, Staphylococcus aureus ATCC 25923, Enterococcus faecalis y Pseudomonas aeruginosa ATCC 27853.* Los resultados, expresados como el promedio del diámetro de la zona de inhibición en milímetros (mm) ± desviación estándar, se presentan a continuación.

Los resultados de la actividad antibacteriana de los apósitos cargados con ciprofloxacino se muestran en la Tabla 2. Frente a *E. coli,* el prototipo 4 exhibió la mayor zona de inhibición (45.66 ± 1.15 mm), seguido por el prototipo 6 (44.0 ± 1.0 mm) y el prototipo 3 (43.66 ± 1.15 mm). Estas inhibiciones fueron comparables o superiores a las observadas con el papel filtro control (43.66 ± 1.15 mm) y el sensidisco de ciprofloxacino (40.66 ± 1.15 mm). El prototipo 5 mostró la menor actividad contra esta cepa (35.33 ± 0.57 mm). Para *S. aureus,* el prototipo 6 presentó la mayor actividad antibacteriana (34.66 ± 1.52 mm), superando al papel filtro (31.0 ± 1.0 mm) y al sensidisco (27.66 ± 0.57 mm). Los prototipos 3 y 4 también mostraron una inhibición considerable (29.0 ± 1.0 mm y 29.33 ± 1.0 mm, respectivamente). El prototipo 2 mostró la menor inhibición (25.0 ± 1.0 mm). En el caso de *E. faecalis,* el prototipo 3 fue el que generó la mayor zona de inhibición (27.0 ± 1.0 mm), mientras que el prototipo 4 (26.33 ± 1.52 mm) y el papel filtro (25.6 ± 0.57 mm) mostraron actividades similares. Los prototipos 2 y 5 presentaron las menores inhibiciones (24.33 ± 0.57 mm y 24.66 ± 2.30 mm, respectivamente), aunque superiores al sensidisco (21.6 ± 0.57 mm). Contra *P. aeruginosa*, el sensidisco de ciprofloxacino mostró la mayor zona de inhibición (38.0 ± 1.0 mm). Entre los prototipos, el 4 fue el más efectivo (33.33 ± 1.52 mm), seguido por los prototipos 2 y 3 (31.33 ± 1.52 mm y 31.30 ± 1.50 mm, respectivamente). Todos los prototipos mostraron una inhibición superior al papel filtro control (28.0 ± 2.0 mm) contra esta bacteria.

Los resultados de la actividad antibacteriana de los apósitos cargados con cefotaxima se resumen también en la Tabla 2. Para *E. coli,* el prototipo 4 demostró la mayor zona de inhibición (43.0 ± 1.0 mm), seguido por el prototipo 6 (42.0 ± 1.0 mm). Ambos superaron ligeramente al papel filtro (40.66 ± 0.57 mm) y al sensidisco de cefotaxima (40.0 ± 1.73 mm). El prototipo 2 presentó la menor actividad (37.66 ± 0.57 mm) entre los apósitos probados contra esta cepa. Frente a *S. aureus*, el prototipo 4 nuevamente mostró la inhibición más alta (31.66 ± 1.52 mm). Los prototipos 3 y 6 también presentaron buena actividad (30.0 ± 1.0 mm y 29.66 ± 1.50 mm, respectivamente), comparables o superiores al papel filtro (29.66 ± 1.52 mm) y al sensidisco (29.0 ± 0.2 mm). Los prototipos 2 y 5 mostraron la menor actividad (28.33 ± 0.57 mm y 28.33 ± 2.08 mm, respectivamente). En cuanto a *E. faecalis,* el prototipo 3 fue el más efectivo con una zona de inhibición de 31.66 ± 1.52 mm, seguido por el prototipo 6 (30.33 ± 2.51 mm). El prototipo 5 mostró la menor actividad (24.0 ± 1.0 mm) contra esta bacteria. La mayoría de los prototipos mostraron inhibiciones comparables o superiores al sensidisco (26.33 ± 1.50 mm). Contra *P. aeruginosa*, la cefotaxima mostró una actividad menor en comparación con las otras cepas. El sensidisco de cefotaxima (22.0 ± 3.6 mm) y el papel filtro (19.66 ± 0.57 mm) mostraron las mayores zonas de inhibición. Entre los prototipos, el 6 tuvo la mayor

actividad (16.33 ± 1.52 mm), mientras que el prototipo 4 presentó la menor (13.0 ± 2.0 mm). Todos los prototipos mostraron actividad antibacteriana, aunque con halos de inhibición más reducidos.

Tabla 4. Análisis antimicrobiano de los apósitos de celulosa.

Material	**Ciprofloxacino $5\mu g$ (mm de inhibición)**			
	E. coli	***S. aureus***	***E. faecalis***	***P. aeruginosa***
2	41.66 ± 1.52^{BC}	25 ± 1.0^{D}	24.33 ± 0.57^{AB}	31.33 ± 1.52^{BC}
3	43.66 ± 1.15^{ABC}	29 ± 1.0^{BC}	27.0 ± 1.0^{A}	31.30 ± 1.50^{BC}
4	45.66 ± 1.15^{A}	29.33 ± 1.0^{BC}	26.33 ± 1.52^{A}	33.33 ± 1.52^{B}
5	35.33 ± 0.57^{D}	26.66 ± 0.57^{CD}	24.66 ± 2.30^{AB}	29.66 ± 1.52^{CD}
6	44 ± 1.0^{AB}	34.66 ± 1.52^{A}	25.0 ± 1.0^{AB}	30.66 ± 1.15^{C}
Papel filtro	43.66 ± 1.15^{ABC}	31.0 ± 1.0^{B}	25.6 ± 0.57^{A}	28.0 ± 2.0^{D}
Sensidisco	40.66 ± 1.15^{C}	27.66 ± 0.57^{CD}	21.6 ± 0.57^{B}	38.0 ± 1.0^{A}

Material	**Cefatoxima $30\mu g$ (mm de inhibición)**			
	E. coli	*S. aureus*	*E. faecalis*	*P. aeruginosa*
2	37.66 ± 0.57^{B}	28.33 ± 0.57^{A}	26.33 ± 0.57^{BC}	15.0 ± 1.0^{BC}
3	40.0 ± 1.0^{AB}	30.0 ± 1.0^{A}	31.66 ± 1.52^{A}	15.33 ± 0.57^{BC}
4	43.0 ± 1.0^{A}	31.66 ± 1.52^{A}	29.0 ± 1.0^{AB}	13.0 ± 2.0^{C}
5	38.66 ± 1.52^{B}	28.33 ± 2.08^{A}	24.0 ± 1.0^{C}	14.33 ± 2.51^{BC}
6	42.0 ± 1.0^{A}	29.66 ± 1.50^{A}	30.33 ± 2.51^{AB}	16.33 ± 1.52^{BC}
Papel filtro	40.66 ± 0.57^{AB}	29.66 ± 1.52^{A}	28.66 ± 1.52^{AB}	19.66 ± 0.57^{AB}
Sensidisco	40.0 ± 1.73^{AB}	29.0 ± 0.2^{A}	26.33 ± 1.50^{BC}	22.0 ± 3.6^{A}

Las medias no conectadas por la misma letra, en la misma columna, son significativamente diferentes (Tukey $p<0.05$). Resultados obtenidos de 3 repeticiones.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se logró el desarrollo y la caracterización exitosa de apósitos biocompatibles a partir de celulosa bacteriana obtenida de la fermentación de té Kombucha. La incorporación de aditivos como colágeno, carboximetilcelulosa, quitosano y alginato permitió modular significativamente las propiedades físico-mecánicas y funcionales de los apósitos, incluyendo la permeabilidad al vapor de agua, la resistencia a la tracción, la elongación, la solubilidad y el grado de hinchamiento. Notablemente, los apósitos formulados demostraron una eficaz capacidad para la carga y liberación de los antibióticos cefotaxima y ciprofloxacino, exhibiendo una notable actividad antibacteriana in vitro contra cepas patógenas de relevancia clínica como *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis y Pseudomonas aeruginosa.* Estos resultados son prometedores y sugieren que los apósitos a base de celulosa bacteriana aquí desarrollados, con sus propiedades adaptables y su potencial antimicrobiano, representan una alternativa viable y sostenible para futuras aplicaciones terapéuticas, particularmente en el manejo de heridas y como sistemas de administración tópica de fármacos.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. G. Soares, M. de Lima, M., V. C. Reolon Schmidt, “Technological aspects of kombucha, its applications and the symbiotic culture (SCOBY), and extraction of compounds of interest: A literature review”, Trends Food Sci. Technol., Vol. 110(February), 2021, pp. 539–550.
2. P. S. Murphy, G. R. D. Evans, “Advances in Wound Healing: A Review of Current Wound Healing Products”, Plast. Surg. Int., 2012, Vol. 1–8, 190436.
3. L. K. Sellappan, A. Sanmugam, S. Manoharan, “Fabrication of dual layered biocompatible herbal biopatch from biological waste for skin - tissue regenerative applications”, Int. J. Biol. Macromol., Vol. 183, 2021, pp. 1106–1118.
4. Z. Keskin, G. O. Akalın, A. F. Çelik, E. B. Denkbaş, “Bacterial cellulose-based wound dressing materials. En “Bacterial nanocellulose: A sophisticated multifunctional material” 2021, pp. 225-251. CRC Press.
5. S. Strohbuecker, S. Kordes, A. Schmideder, A. Ehrmann, “Physical and Chemical Modification Methods for Bacterial Cellulose”, Polymers, Vol. 14(19), 2022, 4156.
6. R. A., Pires, I. J. Moro, S. R. Benjamin, R. R. Costa, R. L. Reis, “Bacterial cellulose and other polysaccharides for biomedical applications. En: Comprehensive Composite Materials II (Vol. 6, 2021, pp. 406-434). Elsevier.
7. S. Gorgieva, J. Trček, J. Bacterial cellulose: Production, modification and perspectives in biomedical applications”, Nanomaterials, Vol. 9(10), 2019, 1352.
8. R. Portela, C. R. Leal, P. L. Almeida, R. G. Sobral, “Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications. Microb. Biotechnol., Vol. 12(4), 2019, pp. 586–610.
9. J. M. Rajwade, K. M. Paknikar, J. V. Kumbhar, “Applications of bacterial cellulose in food, cosmetics and drug delivery”, J. Biomater. Appl., Vol. 29(7), 2015, pp. 923–939.
10. I. Sulaeva, U. Henniges, T. Rosenau, A. Potthast, “Bacterial cellulose as a material for wound treatment: Properties and modifications”, A review. Biotech. Bioeng., Vol. 112(8), 2015, pp.1547–1571.
11. J. Boateng, O. Catanzano, “Advanced Therapeutic Dressings for Effective Wound Healing—A Review”, J. Pharm. Sci., Vol. 104(11), 2015, pp. 3653–3680.
12. J. P. Junker, R. A. Kamel, E. J. Caterson, E. Eriksson, “Clinical impact upon wound healing and inflammation in moist, wet, and dry environments”, Adv. Wound Care, Vol. 2(7), 2013, pp. 348–356.
13. S. Gorgieva, J. Trček, “Bacterial cellulose: Production, modification and perspectives in biomedical applications”, Nanomaterials, Vol. 9(10), 2019, 1352.
14. Ahmed, E. M. (2018). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review”, J. Adv. Res., V

QUITOSANO FOLIAR MEJORA LA ABSORCIÓN DE Mn, Zn Y B EN VÁSTAGO DE LISIANTHUS

Tsujmejy Gómez-Navor, Libia Iris Trejo-Téllez, Juan José Almaraz-Suárez, Fernando Carlos Gómez-Merino, Marco Polo Carballo-Sánchez

Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México. México
gomez.tsujmey@colpos.mx

RESUMEN

Los micronutrimentos incrementan la producción de cultivos florales, mejorando la calidad y prolongando la vida poscosecha de las flores. Esto se debe a su papel en la regulación de la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos y de proteínas y su función como cofactores esenciales en la activación de enzimas involucradas en procesos metabólicos clave para el crecimiento y desarrollo. Por otro lado, el quitosano, como bioestimulante de plantas, es una molécula natural que induce una amplia gama de respuestas fisiológicas y bioquímicas en las plantas, las cuales varían en función de su estructura, concentración, especie y la etapa de desarrollo de la planta. El quitosano ha demostrado ser eficaz en la promoción del crecimiento y la mejora en la absorción de elementos esenciales. El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la aplicación foliar de quitosano en la absorción de micronutrimentos en plántulas de lisianthus. Se utilizaron plántulas recién germinadas de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) cv. Mariachi Blue Double (Sakata), cultivadas en almácigos de 200 cavidades, como material vegetal. El experimento se estableció bajo un diseño DECA con cuatro niveles de quitosano (0, 50, 70 y 90 mg L^{-1}), con 12 repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió en una plántula por cavidad dentro de la charola. Las aplicaciones de quitosano se realizaron de manera foliar a los 54 y 72 días después de la siembra (DDS), utilizando un compuesto comercial con un grado de desacetilación del 70 % y bajo peso molecular (Sigma-Aldrich, Steinheim, Alemania). El experimento finalizó a los 149 DDS. Las concentraciones de micronutrimentos en vástago se determinaron con un espectrofotómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) se efectuaron utilizando el software SAS. Las aplicaciones foliares de quitosano a dosis de 70 mg L^{-1} incrementaron significativamente las concentraciones de Mn, Zn y B en el vástago, en comparación al testigo. En contraste, la aplicación de 50 mg L^{-1} redujo las concentraciones de Fe y Cu en parte aérea. El quitosano estimula la absorción de algunos micronutrimentos, lo que sugiere que su aplicación puede mejorar tanto el rendimiento como la calidad de lisianthus.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la floricultura enfrenta desafíos derivados de los cambios en el comportamiento del consumidor, quien demanda productos de alta calidad, mayor vida poscosecha y obtenidos mediante métodos de producción respetuosos con el medio ambiente. Por lo que es fundamental que los productores adopten prácticas sostenibles que les permitan satisfacer las necesidades de los consumidores actuales, a la par que mejoren la producción y calidad (Rafique *et al*., 2024). La aplicación de bioestimulantes se considera una práctica agrícola novedosa y ecológica (Parađiković *et al*., 2019). En la industria florícola, el uso de bioestimulantes ha sido eficaz para promover el crecimiento, rendimiento y mejorar los atributos de calidad de las flores de corte (Ahmad *et al*., 2025).

Por bioestimulante vegetal se entiende cualquier sustancia benéfica, microorganismos, o ambos, que aplicados a la planta o al suelo impulsan los procesos naturales para mejorar o beneficiar los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares en términos de crecimiento y desarrollo; absorción de nutrientes y eficiencia de uso de nutrientes; tolerancia al estrés abiótico; rendimiento y calidad del cultivo (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2023). Actualmente, se aceptan siete categorías de bioestimulantes vegetales: 1) sustancias húmicas; 2) hidrolizados de proteínas y otros compuestos que contienen N; 3) extractos de algas y productos botánicos; 4) quitosano y otros

biopolímeros; 5) compuestos inorgánicos; 6) hongos beneficiosos; y 7) bacterias beneficiosas (du Jardin, 2015).
De manera particular, el quitosano es un bioestimulante vegetal obtenido la desacetilación parcial de la quitina, el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza después de la celulosa (Riseh *et al*., 2022). El quitosano es un polisacárido lineal catiónico, está compuesto de unidades de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces β-1,4-glucosídicos (Chakraborty *et al*., 2020). Su uso en la agricultura ha ganado cada vez más popularidad debido a su origen natural, baja toxicidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad (Chandrasekaran *et al*., 2024).

La aplicación de quitosano en plantas superiores induce una amplia gama de respuestas fisiológicas, incluidas la absorción de nutrientes, la división y elongación celular, así como la activación enzimática; además, desencadena respuestas bioquímicas como la síntesis de proteínas y fitohormonas. Estos efectos varían en función de su estructura molecular, concentración aplicada, especie vegetal y etapa de desarrollo (Chakraborty *et al*., 2020).

En lirio de piña (*Eucomis bicolor* Baker), la aplicación de quitosano por inmersión de bulbos, incrementó el número de hojas por planta, contenido relativo de clorofila en hojas y el número de bulbos por planta (Byczyńska, 2018). De manera similar, en gladiola (*Gladiolus hybridus* Hort.), el tratamiento con quitosano promovió un mayor número de hojas y mejoró el crecimiento vegetativo general de las plantas (Żurawik, 2025).

Por otra parte, el lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) es una planta herbácea de la familia Gentianaceae. A nivel mundial se posiciona dentro de las 10 flores más producidas y comercializadas, esto se debe a que las flores son grandes, similares a las rosas y se presenta en una amplia variedad de colores (Fatima *et al*., 2022).

El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la aplicación foliar de quitosano en la absorción de micronutrimentos en plántulas de lisianthus.

PARTE EXPERIMENTAL

El experimento se realizó en invernadero, en el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, localizado en las coordenadas geográficas 19.52° LN, 98.88° LO, con una altitud de 2250 m.

Se emplearon semillas recién germinadas de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) cv. Mariachi Blue Double de la empresa Sakata, las cuales fueron sembradas el 16 de diciembre de 2023 en charolas de plástico negro de 200 cavidades, una semilla por cavidad. Como sustrato se empleó una mezcla de turba y perlita (70/30, v/v).

El riego se suministró manualmente según la demanda hídrica y en forma de nebulización empleado una botella pulverizadora a presión manual. La fertilización se realizó con la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 10%. La frecuencia de aplicación fue una vez por semana con una dosis de 1 mL por planta, posteriormente a los 106 días después de la siembra (DDS), la frecuencia de aplicación fue de tres veces por semana con una dosis de 1.5 mL por planta.

El quitosano se preparó a partir de un compuesto comercial de la marca Sigma-Aldrich, con un grado de desacetilación del 70 % y bajo peso molecular. En 250 mL de HCl 0.1 N se disolvió 2.5 g de quitosano. A partir de este stock se tomaron alícuotas para la preparación de los diferentes tratamientos.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar (DECA). Se evaluaron cuatro niveles de quitosano (0, 50, 70 y 90 mg L^{-1}), con 12 repeticiones por tratamiento. La unidad experimental consistió en una plántula por cavidad dentro de la charola.

La aplicación de quitosano se realizó de manera foliar a las 8:00 h a los 54 y 72 DDS, como adherente se empleó Tween 20 a una concentración de 1g L^{-1}.

Variables evaluadas

El análisis nutrimental se realizó a los 149 DDS, al término del experimento. Se tomaron 0.25 g de tejido seco de la parte aérea de las plántulas, previamente molido y tamizado hasta obtener un tamaño de partícula de 2 mm. La determinación de los micronutrimentos se realizó empleando el método descrito por Alcántar-González y Sandoval-Villa (1999), en el cual consiste en la digestión diácida del tejido vegetal utilizando una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico en proporción 2:1 (v:v) a una temperatura de 180 °C en plancha de digestión. Las muestras se filtraron y aforaron con agua desionizada a 25 mL. Con los extractos resultantes se midió la concentración de los micronutrientes usando un espectrofotómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) se efectuaron utilizando el software estadístico Statistical Analysis System versión 9.4 (SAS Institute, 2013).

RESULTADOS

Las aplicaciones foliares de quitosano a dosis de 70 mg L^{-1} incrementaron significativamente las concentraciones de Zn, Mn y B en el vástago (Figura 1c-e), en comparación al testigo. En contraste, la aplicación de 50 mg L^{-1} redujo las concentraciones de Fe y Cu en parte aérea (Figura 1a, b).

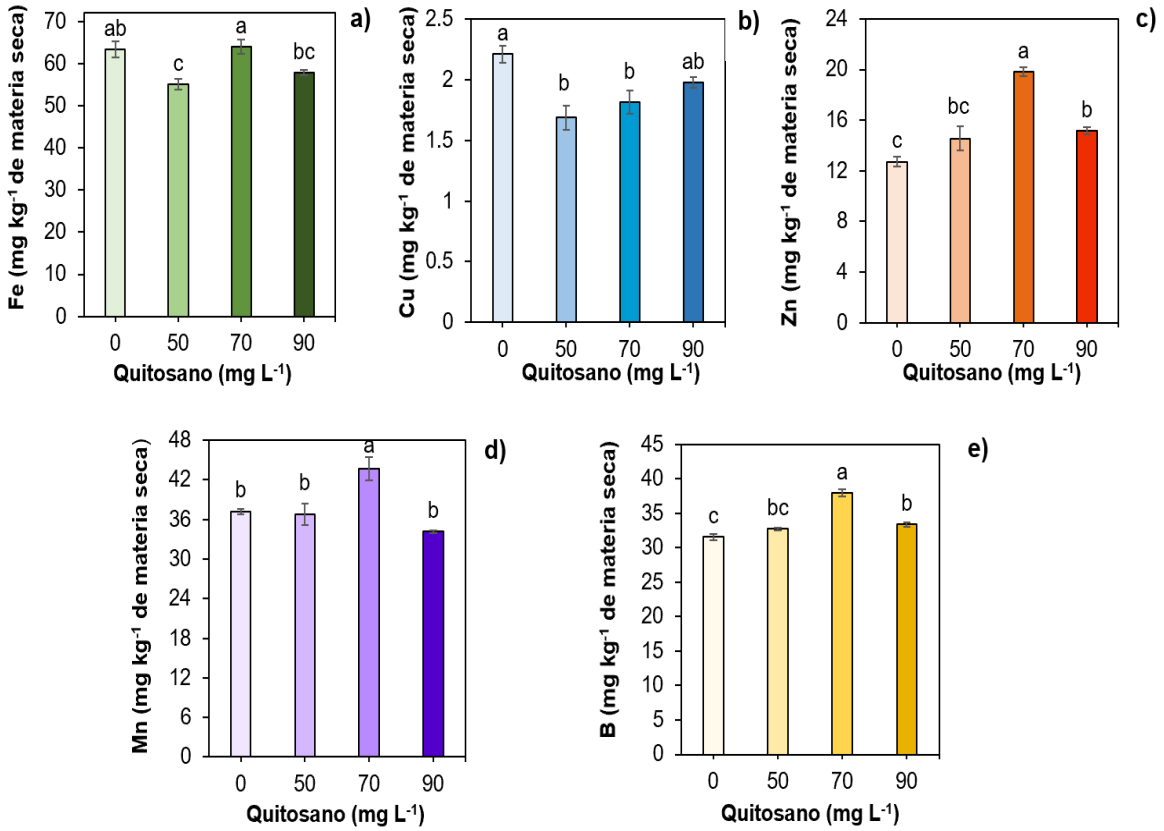


Figura 1. Concentración de micronutrimentos en parte aérea de plántulas de lisianthus a los 149 días después de la siembra, tratadas con dos aplicaciones foliares de quitosano. a) Hierro (Fe). b) Cobre

(Cu). c) Zinc (Zn). d) Manganeso (Mn). e) Boro (B). Letras diferentes sobre las barras de la subfigura, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Las aplicaciones foliares de quitosano incrementan la concentración de algunos micronutrimentos en parte aérea. El incremento de estos elementos minerales esenciales se traduce en mejoras significativas en la producción de los cultivos florales, así como en la calidad y vida poscosecha de las flores (Mudassir *et al*., 2021). Estos efectos están relacionados con el papel fisiológico de los micronutrimentos en la regulación de la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos y de proteínas y su función como cofactores esenciales en la activación de enzimas involucradas en procesos metabólicos clave para el crecimiento y desarrollo (Alcántar-González *et al*., 2016).

Tanto el Zn como el Mn, desempeñan un papel crucial en la regulación de la floración y el desarrollo floral (Nivya *et al*., 2023). El Zn es indispensable en la síntesis de proteínas, ya que forma parte estructural de los ribosomas y participa en la síntesis triptófano, que es precursor del ácido indolacético, por lo que puede estar influenciado directamente en los niveles de auxinas en las plantas. Por su parte el Mn, tiene una función importante en los procesos redox, es activador de numerosas enzimas, cofactor esencial para el complejo generador de oxígeno (OEC) del mecanismo fotosintético, que cataliza la reacción de división del agua en el fotosistema II (PSII). Por último, el boro, está relacionado con el transporte de carbohidratos, síntesis de lignina y celulosa, estabilidad de las paredes celulares y polinización (Marschner, 2012).

CONCLUSIONES

El quitosano es un bioestimulante orgánico que aplicado vía foliar mostró promover la absorción de los micronutrimentos zinc, manganeso y boro, los cuales están involucrados en procesos metabólicos clave que conducen al incremento del rendimiento y a la mejora de la calidad en lisianthus, especie con alta aceptación en México.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Steiner, “The universal nutrient solution”. In: *6th International Congress on Soilless Culture*, (Wageningen, The Netherlands,1984) pp. 633-650.
2. A. Byczyńska, “Chitosan improves growth and bulb yield of pineapple lily (*Eucomis bicolor* Baker) an ornamental and medicinal plant”, World Sci. News, Vol. 110. 2018, pp. 159-171.
3. G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez, L. Fernández-Pavía, M. N Rodríguez-Mendoza, “Elementos esenciales”, in *Nutrición de Cultivos* (Biblioteca Básica de Agricultura, México, 2016), Capítulo 2, pp. 23-52.
4. G. Alcántar-González, M. Sandoval-Villa, Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Publicación Especial No. 10, 1999, Chapingo, México.
5. H. Marschner, “*Marschner's mineral nutrition of higher plants”*. Academic Press, 2012.
6. I. Ahmad, H. Ashfaq, J. M. Dole, T. Hussain, H. Safdar, A. Jabeen, “Biostimulants improve growth, yield and quality of *Eustoma grandiflorum* L. and *Matthiola incana* L.”. Ornam. Hortic., Vol. 31, 2025, e312816.
7. K. Fatima, I. Ahmad, J. M. Dole, N. Ahmad, M. Asif, K. Ziaf, M.A. Badar, K. Fatima, “Folk floral preservatives extend postharvest longevity of *Eustoma grandiflorum* L.”, Sci. Hortic., Vol. 301, 2022,111132.
8. K. R. Nivya, M. K. Singh, R. J. Namita, R. Pandey, M. C. Meena, “Effect of Micronutrients (Zinc and Manganese) on Growth, Quality Flower Production and Postharvest Vase Life of La Hybrid *Lilium* Cv. Pavia”, Biol. Forum, Vol.15, 1, 2023, 230-236.
9. L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, “Beneficial elements: novel players in plant biology for innovative crop production”, Vol. II. Front. Plant Sci., Vol. 14, 2023, 1303462.

10. M. Chakraborty, M. Hasanuzzaman, M. Rahman, M. A. R. Khan, P. Bhowmik, N. U. Mahmud, M. Tanveer, T. Islam, “Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer”, Agriculture, Vol. 10, 12, 2020,624.
11. M. Chandrasekaran, M. Paramasivan, “Chitosan derivatives act as a biostimulants in plants: A review”, Int. J. Biol. Macromol., Vol. 271, 1, 2024, e132720.
12. N. Parađiković, T. Teklić, S. Zeljković, M. Lisjak, M. Špoljarević, “Biostimulants research in some horticultural plant species—A review”, Food Energy Secur., Vol. 8, 2, 2019, e00162.
13. P. Du Jardin, “Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation”, Sci. Hortic, Vol. 196, 2015, pp. 3-14.
14. P. Żurawik, “The effect of chitosan application on growth, development, decorative value and yield of *Gladiolus hybridus* Hort. Corms”, *Acta Sci. Pol. Hortoru.,* Vol. 24, 2, 2025, 53-64.
15. R. S. Riseh, M. Hassanisaadi, M. Vatankhah,S.A. Babaki, E. Ait Barka, “Chitosan as a potential natural compound to manage plant diseases”. Int. J. Biol. Macromol."., Vol. 220, 2022, pp. 998-1009.
16. SAS Institute. Base SAS 9.4. Procedures Guide: Statistical Procedures Second edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 2013. pp.500.
17. S. Mudassir, R. Ahmad, M. A. Anjum, “Foliar application of micronutrients enhances growth, flowering, minerals absorption and postharvest life of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) in calcareous soil”, J. Hortic. Sci. Technol., Vol. 4, 2, 2021, pp. 41-47.
Z. Rafique, H. Riaz, A. Ahmad, T. Iqbal, “Emerging Trends in the Floriculture Industry: Adapting to Market Demands and Consumer

EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD AGUDA DE ÓXIDO DE ALUMINIO Y ZINC EN ARTEMIA SALINA

Giovanni García Domínguez[1], Guadalupe Espinosa Garcia[1], Eduardo Marcial Martínez[1], Florencia Del Carmen Salinas Pérez[1], Lorena Elizabeth Chávez Guitrón*[1], Aristeo Garrido Hernández[2]

[1] Universidad Tecnológica de Tecámac, [2] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

RESUMEN

La toxicidad de los óxidos metálicos, como el óxido de zinc (ZnO) y el óxido de aluminio (Al2O3), ha sido ampliamente investigada debido a su uso en diversas aplicaciones industriales y biomédicas. En este contexto, el ensayo de toxicidad en nauplios Artemia salina se empleó para evaluar el impacto de estos compuestos en organismos acuáticos. Este estudio se centró en la evaluación de la toxicidad de soluciones de ZnO y Al2O3 en concentraciones que van del 10 al 60%. Como control positivo se utilizó alcohol etílico al 70% y como control negativo, solución salina fisiológica al 0.9%. En cajas de cultivo de 6 pozos se colocaron 10 individuos por tratamiento, los cuales previamente fueron lavados dos veces con SSF 0.9%. Se realizaron tres repeticiones por concentración. La variable evaluada fue la mortalidad de las artemias a las 1, 4, 8 y 24 horas. A las 24 horas, en el óxido de zinc del 10 al 40%, la mortalidad fue del 16.66%, y al 60% fue de 26.66%. Para el óxido de aluminio en las concentraciones del 10 al 60%, la mortalidad fue de 16.66%. Los resultados indican que tanto el óxido de zinc como el óxido de aluminio presentan un efecto tóxico moderado sobre Artemia salina, con un incremento en la mortalidad a medida que aumentan las concentraciones de ambos compuestos. Sin embargo, las concentraciones más bajas no causaron un impacto significativo, lo que sugiere que el efecto tóxico es dependiente de la concentración. Estos hallazgos resaltan la importancia de realizar pruebas de toxicidad para evaluar el riesgo toxicológico de estos materiales en artemias.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre la toxicidad aguda de nanopartículas metálicas en organismos acuáticos ha ganado relevancia en los últimos años debido a la creciente presencia de estos materiales en el medio ambiente y su potencial impacto ecológico. En particular, el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el óxido de zinc (ZnO) son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas, lo que plantea interrogantes sobre sus efectos en la biota acuática (Ates et al., 2015; Ates et al., 2013).

La Artemia salina, un pequeño crustáceo halófilo, ha sido empleado como organismo modelo en estudios de toxicidad debido a su sensibilidad a contaminantes y su relevancia en ecosistemas acuáticos. Investigaciones han demostrado que la exposición a nanopartículas de Al_2O_3 puede inducir acumulación intracelular, estrés oxidativo y efectos tóxicos en A. salina, siendo las nanopartículas de menor tamaño más perjudiciales (Ates et al., 2015). De manera similar, las nanopartículas de ZnO han mostrado efectos tóxicos en A. salina, con mortalidades que aumentan con la concentración y el tiempo de exposición, atribuibles a la liberación de iones Zn^{2+} y la inducción de estrés oxidativo (Ates et al., 2013; Zhang et al., 2019).

En el contexto de la ingeniería de biomateriales, el desarrollo de películas con propiedades cicatrizantes que incorporen nanopartículas de Al_2O_3 y ZnO ha emergido como una estrategia prometedora. Estas películas combinan las propiedades biocompatibles y antimicrobianas de los óxidos metálicos con la capacidad regenerativa de los biomateriales, ofreciendo potencial para aplicaciones en medicina regenerativa y tratamiento de heridas (Jaafarzadeh et al., 2017; Dağlıoğlu et al., 2016).

Este estudio se centró en la evaluación de la toxicidad aguda de Al_2O_3 y ZnO en nauplios A. salina, con el objetivo de establecer parámetros de seguridad para su incorporación en películas

cicatrizantes. Al comprender los efectos tóxicos de estas nanopartículas en un organismo modelo, se busca garantizar la seguridad ambiental y biológica de los productos desarrollados, contribuyendo al avance en la ingeniería de biomateriales con aplicaciones terapéuticas.

TEORÍA

Óxido de aluminio (Al_2O_3)
Características fisicoquímicas
El óxido de aluminio (Al_2O_3), conocido también como alúmina, es un óxido anfótero que se presenta comúnmente en forma de polvo blanco cristalino. Tiene un punto de fusión elevado (2072 °C) y una densidad de aproximadamente 3.95 g/cm³ en su forma más estable, la α-alúmina (corindón). Es químicamente estable, insoluble en agua, y resistente a la corrosión en ambientes agresivos (Auerkari, 1996; Sharma et al., 2019).

Aplicaciones

El Al_2O_3 se utiliza ampliamente en la industria debido a sus propiedades térmicas, mecánicas y químicas. Es fundamental en la producción de cerámicas técnicas, materiales refractarios, abrasivos industriales (como papel de lija), y como soporte catalítico en procesos petroquímicos. Además, por su biocompatibilidad, se emplea en la fabricación de implantes médicos y dentales. En nanotecnología, se ha estudiado como componente de películas delgadas y recubrimientos dieléctricos debido a sus propiedades dieléctricas y ópticas.

Óxido de Zinc (ZnO)

Características fisicoquímicas

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor de tipo n con una banda prohibida directa de 3.37 eV a temperatura ambiente. Tiene estructura hexagonal tipo wurtzita, alta estabilidad térmica, y propiedades fotocatalíticas y piezoeléctricas. Es insoluble en agua, pero se disuelve en ácidos y álcalis fuertes. Estas propiedades lo hacen adecuado para aplicaciones en sensores, dispositivos electrónicos, y en remediación ambiental (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014; Wang et al., 2014).

Aplicaciones

El ZnO es ampliamente utilizado en industrias como la electrónica (en transistores, LED, y celdas solares), la cosmética (protector solar y cremas dermatológicas), la medicina (por su acción antimicrobiana), y la agricultura (en fertilizantes y pesticidas). Además, por su actividad fotocatalítica, se ha investigado para la degradación de contaminantes orgánicos en medios acuosos (Zhang et al., 2019).

Toxicología *in vivo*.

La toxicología in vivo es una disciplina esencial que evalúa los efectos adversos de sustancias químicas en organismos vivos completos, permitiendo observar la interacción de compuestos con sistemas biológicos complejos. A diferencia de los estudios in vitro, los modelos in vivo consideran rutas de absorción, distribución, metabolismo y excreción (ADME), así como respuestas fisiológicas integradas, lo cual es esencial para la evaluación de la toxicidad real de un agente químico (Leist et al., 2008). Entre los organismos comúnmente utilizados en toxicología in vivo se encuentran vertebrados como roedores y peces, y modelos alternativos como insectos o invertebrados marinos.

En este contexto, Artemia salina se ha consolidado como un modelo eficaz en la evaluación de la toxicidad de diversas sustancias. Su uso en pruebas de toxicidad, como el ensayo de letalidad en camarones de salmuera, ha demostrado ser un método confiable y económico para la detección rápida de compuestos tóxicos, incluyendo nanopartículas y productos farmacéuticos (Rajabi et al.,

2015; Kumar et al., 2017). Además, estudios recientes han evidenciado que Artemia salina es sensible a contaminantes como el filtro solar benzofenona-3 y microplásticos, lo que refuerza su aplicabilidad en ecotoxicología (Ortiz-Román et al., 2024; Parra et al., 2001).

Los bioensayos de toxicidad aguda en nauplios de Artemia salina son herramientas ampliamente utilizadas en ecotoxicología para evaluar los efectos tóxicos de diversas sustancias químicas y nanomateriales. Estos ensayos permiten determinar la concentración letal media (LC_{50}) de un compuesto tras una exposición de 24 a 96 horas, proporcionando información valiosa sobre su potencial tóxico en organismos acuáticos. En estudios recientes, se ha evaluado la toxicidad de nanopartículas de óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de zinc (ZnO) en Artemia salina. Ates et al. (2015) investigaron la acumulación, toxicidad y depuración de nanopartículas de Al_2O_3 en larvas de A. salina, observando que las nanopartículas más pequeñas (5 nm) presentaron mayor toxicidad que las más grandes (0.4 µm), con una mortalidad máxima del 34% a 100 mg/L tras 96 horas de exposición. De manera similar, Ates et al. (2013) evaluaron el impacto de nanopartículas de ZnO en larvas de A. salina, encontrando que la mortalidad aumentó significativamente con la concentración y el tiempo de exposición, alcanzando una LC_{50} de aproximadamente 100 mg/L a 96 horas. Estos resultados subrayan la utilidad de Artemia salina como modelo biológico eficaz y sensible para estudios ecotoxicológicos de nanomateriales metálicos.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación de soluciones y evaluación de toxicidad con *Artemia salina*

Para la preparación de las soluciones, se inició pesando 0.0270 g de óxido de zinc y 0.0270 g de óxido de aluminio, se diluyeron individualmente en 20 ml de agua destilada. Posteriormente se tomó 0.01 ml de estas diluciones y se mezclaron con 20 ml agua destilada. Las muestras fueron sometidas a un baño ultrasónico a 40 kHz durante 15 minutos a 30°C para favorecer la dispersión. Una vez finalizado el tratamiento, el contenido de cada tubo fue vaciado en cajas Petri, que luego fueron introducidas en una estufa de convección a 80°C durante 120 minutos para proceder al secado del material. Posteriormente se recuperó el polvo formado en las cajas Petri y se volvió a añadir a tubos de ensayo, agregando nuevamente 20 ml de agua destilada. Estas nuevas muestras fueron sometidas de nuevo al baño ultrasónico durante 15 minutos a 30°C, en el caso de los dos óxidos. Posteriormente, se realizaron pruebas de pH para determinar el nivel de dispersión alcanzado por cada muestra.

Para evaluar la toxicidad de las muestras, se empleó el modelo biológico de Artemia salina. Se utilizaron cajas de cultivo celular estériles de seis pozos, los cuales fueron rotulados de acuerdo al tratamiento. Se colocaron 10 artemias en cada pozo con 5 ml de solución y se realizaron 3 repeticiones por tratamiento, en tres ocasiones. Como control positivo se utilizó alcohol etílico al 70% y como control negativo se colocó SSF al 0.09%, en los pozos restantes se adicionaron los óxidos los cuales se evaluaron en concentraciones del 10 al 60%. Las cajas de cultivo se mantuvieron abiertas durante el tiempo del ensayo y se mantuvieron a una temperatura controlada en un rango de 24 a 27°C. La variable evaluada fue la mortalidad, y esta se verificó a la 1 3, 8 y 24 horas postexposición. Esta se calculó dividiendo las artemias muertas entre el total de individuos iniciales y el cociente obtenido se multiplicó por 100, por lo que la variable se expresa en porcentaje.

RESULTADOS

Tabla 1. Porcentaje de mortalidad de *A. salina*, en soluciones de ZnO a diferentes concentraciones y tiempos de exposición.

Tiempo horas	Control positivo	Control negativo	Concentraciones ZnO%					
			10	20	30	40	50	60
1	100	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	3.53	6.66	6.66
24	0	0	16.66	16.66	16.66	16.66	20	26.66

La tabla 1 muestra los resultados del porcentaje de mortalidad de A. salina en soluciones de ZnO en concentraciones de 10 al 60% en diferentes tiempos de exposición. En el control positivo la mortalidad fue del 100% a la hora de exposición, en el control negativo se presentó una mortalidad del 0% en todas las mediciones, en cuanto a las diferentes concentraciones de ZnO se observó lo siguiente, cuyos resultados se presentan a continuación: 10, 20, 30 y 40%: Mortalidad del 16.66% a las 24 horas.

- 50%: Mortalidad del 20% a las 24 horas.
- 60%: Mortalidad del 26.66% a las 24 horas.
- 40%: Mortalidad del 3.33% a las 8 horas.

Los resultados obtenidos muestran que el óxido de zinc (ZnO) presenta toxicidad sobre Artemia salina en concentraciones superiores al 40%, lo que sugiere una posible relación dosis-respuesta. La mortalidad aumentó de forma moderada con el incremento en la concentración, alcanzando un 26.66% en la concentración más alta (60%) a las 24 horas. Estos datos coinciden con estudios previos que reportan que el ZnO puede inducir toxicidad aguda en organismos acuáticos, atribuida principalmente a la liberación de iones Zn^{2+} y a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que provocan estrés oxidativo, daño a membranas celulares y alteraciones metabólicas (Ates et al., 2013; Güler et al., 2019).

En particular, Ates et al. (2013) encontraron que la toxicidad del ZnO está relacionada con su solubilidad y tamaño de partícula, aspectos clave para su interacción con los organismos. Además, se ha documentado que Artemia salina es un bioindicador confiable y sensible para ensayos de toxicidad aguda, lo que respalda su uso en este tipo de evaluaciones (Güler et al., 2019).

A pesar de la toxicidad observada a concentraciones elevadas, las concentraciones menores (10–30%) mostraron baja letalidad, lo cual podría indicar que, en condiciones ambientales realistas, el riesgo agudo de exposición a ZnO podría ser bajo. No obstante, es importante considerar que los efectos subletales o crónicos, así como la bioacumulación, no fueron evaluados en este estudio. Estudios complementarios han sugerido que incluso en bajas concentraciones, la exposición prolongada al ZnO puede afectar el comportamiento, crecimiento y reproducción de especies acuáticas (Ates et al., 2013).

Si bien las concentraciones más altas de ZnO mostraron efectos tóxicos considerables, se requiere una evaluación ecotoxicológica más amplia, incluyendo ensayos de toxicidad crónica y multiespecie, para comprender plenamente la toxicidad de soluciones de ZnO.

Tabla 2. Porcentaje de mortalidad de A. salina, en soluciones de Al2O3 a diferentes concentraciones y tiempos de exposición.

Tiempo horas	Control positivo	Control negativo	Concentraciones Al_2O_3%					
			10	20	30	40	50	60
1	100	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
24	0	0	16.66	16.66	16.6	16.6	16.6	16.6

Los resultados del estudio indican que el óxido de aluminio (Al_2O_3) induce una baja mortalidad aguda en Artemia salina, incluso a concentraciones elevadas (hasta 60%). La mortalidad observada a las 24 horas se mantuvo en un 16.66% en todos los tratamientos, lo que sugiere que el Al_2O_3 presenta una toxicidad limitada en exposiciones cortas bajo las condiciones evaluadas.

Este hallazgo es consistente con lo reportado por Ates et al. (2013), quienes demostraron que las nanopartículas de Al_2O_3 presentan una toxicidad moderada en Artemia salina, dependiente de su tamaño, forma y concentración. En su estudio, nanopartículas más pequeñas mostraron una mayor bioacumulación y estrés oxidativo, medido por biomarcadores como el malondialdehído (MDA), que está asociado con daño celular por peroxidación lipídica.

La baja toxicidad observada en este estudio también puede estar relacionada con la escasa solubilidad del Al_2O_3 en agua salina, lo que limita la liberación de iones de aluminio libres, considerados como la principal forma tóxica en medios acuáticos (González et al., 2016). Además, la capacidad de las nanopartículas de formar agregados puede reducir su biodisponibilidad y, en consecuencia, su toxicidad (Misra et al., 2012).

Sin embargo, es importante considerar que el presente estudio se enfocó únicamente en efectos agudos. Existen investigaciones que han reportado efectos subletales y crónicos del Al_2O_3, como alteraciones en el comportamiento, crecimiento o cambios en la expresión de genes relacionados con el estrés celular en otros organismos acuáticos (Baun et al., 2008; Rossi et al., 2022). Por ello, se recomienda complementar estos hallazgos con estudios de toxicidad crónica, mecanismos de acción celular y ensayos en especies de diferentes niveles tróficos para una evaluación ecotoxicológica más robusta.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que el óxido de zinc (ZnO) presenta toxicidad aguda sobre nauplios de Artemia salina, especialmente a concentraciones superiores al 40%. Las concentraciones de 50% y 60% generaron una mortalidad del 20% y 26.66% respectivamente a las 24 horas, evidenciando una relación dosis-respuesta. En contraste, las concentraciones menores (10–30%) produjeron una baja mortalidad, lo que sugiere que, en escenarios ambientales con presencia limitada de ZnO, el riesgo inmediato para esta especie bioindicadora podría ser bajo.

No obstante, considerando la capacidad del ZnO para liberar iones metálicos y generar especies reactivas de oxígeno, así como su potencial acumulativo en sistemas acuáticos, se recomienda realizar estudios complementarios de toxicidad crónica, bioacumulación y efectos subletales en diferentes organismos acuáticos. La información generada puede ser útil para establecer límites seguros de concentración de ZnO en cuerpos de agua y fortalecer la regulación ambiental sobre el uso de nanomateriales metálicos.

El óxido de aluminio mostró baja toxicidad aguda en nauplios de Artemia salina, con mortalidades menores al 25% incluso a concentraciones del 60%. No se observó una relación clara dosis-respuesta en términos de letalidad, lo cual puede deberse a la limitada solubilidad y biodisponibilidad del compuesto. Aunque estos resultados sugieren un riesgo ambiental bajo en términos agudos, se requiere evaluar su impacto en exposiciones prolongadas y bajo condiciones ambientales más complejas.

Perspectivas

A partir de los resultados obtenidos, se abre la posibilidad de emplear tanto el óxido de zinc como el óxido de aluminio en concentraciones seguras para el desarrollo de películas biocompatibles con potencial uso cicatrizante, especialmente en combinación con biopolímeros como el quitosano. Estudios previos han demostrado que concentraciones de ZnO entre el 1% y el 5% en matrices de quitosano pueden ofrecer propiedades antimicrobianas y cicatrizantes sin generar toxicidad significativa en aplicaciones tópicas. Asimismo, el óxido de aluminio, debido a su baja toxicidad aguda, podría incorporarse en proporciones similares o ligeramente mayores, actuando como refuerzo estructural o modulador de la liberación de compuestos activos.

Por tanto, se recomienda explorar formulaciones de películas con quitosano y concentraciones de ZnO y Al_2O_3 entre el 1% y el 5% para evaluar su eficacia cicatrizante, propiedades físico-químicas y biocompatibilidad. Estas investigaciones contribuirán tanto al desarrollo de materiales terapéuticos seguros como a una mejor comprensión del comportamiento ambiental de los nanomateriales involucrados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Auerkari, P. (1996). Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. Technical Research Centre of Finland, Espoo. VTT Publications
2. Ates, M., Demir, V., Arslan, Z., Daniels, J., Farah, I. O., & Bogatu, C. (2015). Evaluation of alpha and gamma aluminum oxide nanoparticle accumulation, toxicity, and depuration in Artemia salina larvae. *Environmental Toxicology*, 30(1), 109–118. https://doi.org/10.1002/tox.21917
3. Ates, M., Daniels, J., Arslan, Z., Farah, I. O., & Rivera, H. F. (2013). Comparative evaluation of impact of Zn and ZnO nanoparticles on brine shrimp (Artemia salina) larvae: effects of particle size and solubility on toxicity. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(2), 225–233.
4. Baun, A., Sørensen, S. N., Rasmussen, R. F., Hartmann, N. B., & Koch, C. B. (2008). Toxicity and bioaccumulation of xenobiotic nanoparticles in the aquatic environment: a review. Environmental Toxicology and Chemistry, 27(9), 1951–1958. https://doi.org/10.1897/08-029.1
5. Dağlıoğlu, Y., Altınok, İ., İlhan, H., & Sökmen, M. (2016). Determination of the acute toxic effect of ZnO-TiO_2 nanoparticles in brine shrimp (Artemia salina). *Acta Biologica Turcica*, 29(1), 6–13.
6. González, M., Morillo, J., & de la Rosa, J. (2016). Ecotoxicological risk assessment of aluminum in aquatic ecosystems: A review. Science of the Total Environment, 541, 441–455. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.088
7. Güler, G., Yılmaz, M., & Yılmaz, E. (2019). Effects of Zn and ZnO nanoparticles on Artemia salina and Daphnia magna: toxicity, accumulation and elimination. Ecotoxicology and Environmental Safety, 173, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.019
8. Jaafarzadeh, N., Khoshnood, R., Jamili, S., Farshchi, P., & Taghavi, L. (2017). Acute toxicity of TiO_2, CuO and ZnO nanoparticles in brine shrimp, Artemia franciscana. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 16(4), 1287–1296. https://doi.org
9. Kumar, D., Roy, R., Parashar, A., Raichur, A. M., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A., & Mukherjee, A. (2017). Toxicity assessment of zero valent iron nanoparticles on Artemia salina. Environmental Toxicology, 32(5), 1617–1627. https://doi.org/10.1002/tox.22389
10. Kołodziejczak-Radzimska, A., & Jesionowski, T. (2014). Zinc oxide—from synthesis to application: A review. Materials, 7(4), 2833–2881.
11. Parra, A. L., Yhebra, R. S., Sardiñas, I. G., & Buela, L. I. (2001). Comparative study of the assay of Artemia salina L. and the estimate of the medium lethal dose (LD50 value) in mice, to determine oral acute toxicity of plant extracts. Phytomedicine, 8(5), 395-400.

12. Sharma, A., Pandey, A., & Jain, S. (2019). Alumina nanomaterials for environmental remediation: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(6), 103335. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103335
13. Misra, S. K., Dybowska, A., Berhanu, D., Luoma, S. N., & Valsami-Jones, E. (2012). The complexity of nanoparticle dissolution and its importance in nanotoxicological studies. Science of the Total Environment, 438, 225–232.
14. Ortiz-Román, M. I., Casiano-Muñiz, I. M., & Román-Velázquez, F. R. (2024). Toxicity of UV filter benzophenone-3 in brine shrimp nauplii (Artemia salina) and zebrafish (Danio rerio) embryos. Journal of Xenobiotics, 14(2), 537–553.
15. Rajabi, S., Ramazani, A., Hamidi, M., & Naji, T. (2015). Artemia salina as a model organism in toxicity assessment of nanoparticles. Environmental Toxicology, 30(5), 506–514. https://doi.org/10.1002/tox.21967
16. Rossi, G., Barnoud, J., Monticelli, L., & Tieleman, D. P. (2022). Molecular view of the interaction of nanoparticles with biological membranes. Nature Nanotechnology, 17(1), 27–37.
17. Wang, Z. L. (2014). Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications. Journal of Physics: Condensed Matter, 16(25), R829.
18. Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M., & York, D. (2007). Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). Journal of Nanoparticle Research, 9(3), 479–489. https://doi.org/10.1007/s11051-006-9150-1
19. Zhang, Y., Wang, L., & Liu, Y. (2019). Effects of Zn and ZnO Nanoparticles on Artemia salina and Daphnia magna Organisms: Toxicity, Accumulation and Elimination. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 1–8.

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE HARINA DE GUAYABA, OBTENIDA A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA

Miguel Alejandro Guillén Hernández, Alondra Chávez Martínez, Consuelo de Jesús Cortés Penagos, Berenice Yahuaca Juárez, Liliana Márquez Benavides.

Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. México.
consuelo.cortes@umich.mx

RESUMEN

El fruto de guayaba es muy versátil para implementarlo como materia prima en la industria alimentaria. En México se destinan alrededor de 10,000 toneladas de la producción de la fruta para obtener pulpa, para elaboración de jugo, bebidas, y elaboración de dulces de guayaba, los cuales son vendidos como dulces tradicionales. Es importante tomar en cuenta no solo el producto principal de la guayaba en la industria, que es la pulpa, sino también los residuos, como la semilla de la fruta, que se considera un desecho industrial con gran potencial, ya que, al utilizarlo, se abordan tanto el problema de contaminación y de aprovechamiento como subproducto de esta industria. En forma de harina, su manejo y utilización son alternativa. El análisis proximal de la harina de residuos de semilla de guayaba es el siguiente: proteína (8.88%), grasas (16.85%), fibra cruda (64.49%), cenizas (1.50%), humedad (5.55%), entre los más destacados, su composición, la hace una buena alternativa de uso. Para el desarrollo de esta investigacion se obtuvo una muestra de semillas del fruto de guayaba previamente tratadas térmicamente (semilla-residuo), provenientes de AGRINOVA, industria de la obtención de pulpa de frutos, en la ciudad de Morelia, Michoacán. Las semillas-residuo fueron analizadas en seco, como harina, para lo cual las muestras de semillas-residuo de guayaba fueron deshidratadas a 70°C durante 6 horas. Posteriormente, molidas en un molino Goldenwall y tamizadas, obteniendo lotes, con diferente tamaño de partícula: harina: 0.058928 cm, residuos y fermentadas: 0.1016 cm y triturados: aprox. 0.1778 cm. El objetivo del trabajo, relacionar el tamaño de partícula con las características fisicoquímicas que presenta este residuo en forma de harina. Se utilizó harina, obtenida de semillas de fruto fresco de guayaba, y de residuos de la industria, con en fin de obtener un analisis comparativo de sus propiedades. Las propiedades evaluadas en todos los lotes fueron: Humedad, Color, Capacidad de absorción de agua, Capacidad de retención de aceite, Capacidad espumante, Capacidad emulsificante y estabilidad, Formación de gel. Dando los siguientes resultados: el contenido de Humedad de los lotes entre 4 – 6 %; en el ángulo de matíz “Hue”, capacidad emulsificante y estabilidad de la emulsión, así como en la formación de gel, todas las harinas presentan valores similares. La Capacidad de retención de aceite, con respecto a la harina fresca, todas las otras harinas evaluadas, presentan un valor mayor; en el índice de saturación “Chroma”, existe diferencia de las harinas obtenidas de residuo con la de harina fresca, sin embargo, las harinas de triturados y fermentados, no presentan diferencia con respecto a la harina fresca; la capacidad de absorción de agua, y el índice de solubilidad en agua, con respecto a la harina fresca, las harinas fermentada y triturados, no presentan diferencia, siendo la diferencia significativa es con las harinas de residuos, con un menor valor de este parámetro. La única harina que presenta capacidad de formación de espuma fue la harina fermentada. Los resultados obtenidos nos permiten comparar los lotes, y relacionar sus propiedades para futuros productos y usos.

INTRODUCCIÓN

La industria agroalimentaria genera enormes cantidades de desechos de procesamiento de frutas y hortalizas, lo que abre una importante área de investigación destinada a minimizarlos y gestionarlos eficientemente para apoyar el concepto de economía cero y/o circular (Ben-Othman et al., 2020). En el caso de los subproductos industriales de las frutas la atención está en reducir el volumen de residuos alimentarios acumulados en los vertederos, además de desarrollar estrategias mediante la reutilización con el propósito de valorar y añadir valor económico. La eliminación del desperdicio de alimentos conduce a resolver diferentes problemas mundiales en sectores: social, medio ambiente

y económico. Los subproductos representan una rica fuente de compuestos valiosos como proteína, aceites, polifenoles con alta actividad antioxidante; que se pueden extraer a través de metodologías biotecnológicas para futuras aplicaciones industriales. En este contexto, la gestión de los subproductos de las frutas se ve obligada a pasar de una economía lineal a una economía circular (Campos et al., 2020).

La valorización efectiva de los residuos/productos puede ayudar de manera eficiente a reducir el estrés medioambiental al disminuir la contaminación injustificada, visualizando posibles destinos de los residuos alimentarios, específicamente, en las prácticas más sostenibles que convierten los residuos en recursos valiosos. En el caso del fruto de guayaba, esta se consume principalmente en fresca, también se procesa en jugo, néctar, pulpa, mermelada, gelatina, rodajas en almíbar, puré de guayaba enlatada, barra de frutas, listo para servir bebidas, productos deshidratados, agente aromatizante en caramelos, pasteles, galletas y barras de chocolate, así como ser utilizado como aditivo para otros jugos de frutas o pulpas, esta industrialización de la guayaba tiene un residuo mayoritario, la semilla; de características particulares: abundancia en el fruto, además de una considerable dureza, por lo que se vuelve un residuo, con las implicaciones ya mencionadas; la opción de aprovechamiento es su transformación en nuevos productos alimenticios que incluyen la producción de polvo, ayudando a mejorar y mejorar el valor de la fruta y a ponerla a disposición durante todo el año para una mejor utilización, una vez que se conozca su composición química y sus propiedades tecnofuncionales, tanto de la semilla-residuo como del polvo (harina) de guayaba. Las propiedades tecno-funcionales se establecen por la composición y estructura molecular de los componentes individuales y las interacciones que se suscitan entre ellos, de tal forma que dichas propiedades podrían ser consideradas como el resultado de los distintos cambios conformacionales o de las distintas interacciones que tienen lugar entre los componentes del alimento, tales como las interacciones entre proteínas, entre proteínas y polisacáridos, lípidos ó compuestos fenólicos. La evaluación de estas interacciones, permiten predecir el comportamiento de estas biomoléculas dentro de un producto alimenticio, particularmente en las harinas, por consiguiente, determinará su campo de aplicación en la industria de alimentos, ya que podría afectar o modificar alguna característica de la matriz alimentaria contribuyendo a la calidad final del producto correlacionándose a su vez se con las propiedades sensoriales. Entre las propiedades tecno-funcionales destacan aquéllas que están relacionadas con el agua, comprendidas como propiedades de hidratación, entre las que destacan la capacidad de absorción de agua y la capacidad de retención de agua, son particularmente dos los compuestos involucrados en la tecno-funcionalidad, el almidón y las proteínas (Patane et al., 2004).

La capacidad de retención de agua, es decir, la habilidad del material húmedo para retener agua cuando el material ha sido sometido a fuerzas centrífugas externas o de compresión; por lo tanto, es la suma del agua enlazada y del agua atrapada físicamente, siendo ésta última la de mayor contribución a esta capacidad. Igualmente, las proteínas son las responsables del incremento o reducción que experimenta la capacidad de retención de agua en los alimentos y se manifiesta en otras características como la textura (Granito et al., 2007).

La propiedad de absorción de aceite es fundamental en la elaboración de alimentos fritos a base de harina, debido al papel que desempeña en el desarrollo del poder oxidativo y en el enranciamiento del alimento (Chel-Guerrero et al., 2002). Esta propiedad, importante y deseable en un alimento para la conservación de aromas, para conseguir una mejor palatabilidad y para incrementar la vida de anaquel de los productos alimenticios (Granito et al., 2007). Las interacciones proteína-lípido, lípido-lípido y la fracción del almidón presente en las harinas, son responsables de la contribución energética, de las propiedades sensoriales y de los cambios producidos en otras propiedades tecno-funcionales, como por ejemplo la capacidad de hinchamiento y gelificación que tienen numerosas aplicaciones en la industria alimentaria (Aguilera, 2009).

Figura 1. Semilla de guayaba residuo.

Para las harinas, las propiedades tecnofucionales son de suma importancia, ya que permiten predecir el comportamiento de los ingredientes proteicos dentro de un producto alimenticio, determinando su campo de aplicación en la industria de alimentos. Las propiedades tecno-funcionales se definen como cualquier propiedad fisicoquímica que proporciona información sobre cómo un ingrediente o componente en particular (proteína, carbohidrato) podría afectar o modificar alguna característica de la matriz alimentaria y que contribuye a la calidad final del producto correlacionándose a su vez se con las propiedades sensoriales. Estas propiedades se establecen por la composición y estructura molecular de los componentes individuales y las interacciones que se suscitan entre ellos, de tal forma que dichas propiedades podrían ser consideradas como el resultado de los distintos cambios conformacionales o de las distintas interacciones que tienen lugar entre los componentes del alimento, tales como las interacciones entre proteínas, entre proteínas y polisacáridos, lípidos, compuestos fenólicos ó ácido fítico. La importancia de estas propiedades radica en que permiten predecir el comportamiento de los ingredientes proteicos dentro de un producto alimenticio, por consiguiente, determinará su campo de aplicación en la industria de alimentos. Entre las propiedades tecno-funcionales destacan aquéllas que están relacionadas con el agua, comprendidas como propiedades de hidratación, entre las que destacan la capacidad de absorción de agua y la capacidad de retención de agua, son particularmente dos los compuestos involucrados en la tecno-funcionalidad, el almidón y las proteínas (Patane et al., 2004). La capacidad de retención de agua, es decir, la habilidad del material húmedo para retener agua cuando el material ha sido sometido a fuerzas centrífugas externas o de compresión; por lo tanto, es la suma del agua enlazada y del agua atrapada físicamente, siendo ésta última la de mayor contribución a esta capacidad. Igualmente, las proteínas son las responsables del incremento o reducción que experimenta la capacidad de retención de agua en los alimentos y se manifiesta en otras características como la textura (Granito et al., 2007). La propiedad de absorción de aceite es fundamental en la elaboración de alimentos fritos a base de harina de legumbres, debido al papel que desempeña en el desarrollo del poder oxidativo y en el enranciamiento del alimento (Chel-Guerrero et al., 2002). El mecanismo de esta propiedad se debe a la retención física por atracción capilar. Esta propiedad, importante y deseable en un alimento para la conservación de aromas, para conseguir una mejor palatabilidad y para incrementar la vida de anaquel de los productos alimenticios (Granito et al., 2007). Las interacciones proteína-lípido, lípido-lípido y la fracción del almidón presente en las harinas, son responsables de la contribución energética, de las propiedades sensoriales y de los cambios producidos en otras propiedades tecno-funcionales, como por ejemplo la capacidad de hinchamiento y gelificación que tienen numerosas aplicaciones en la industria alimentaria (Aguilera, 2009).

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de esta investigacion se obtuvo una muestra de semillas del fruto de guayaba previamente tratadas térmicamente (semilla-residuo), provenientes de AGRINOVA, industria de la obtención de pulpa de frutos, en la ciudad de Morelia, Michoacán. Las semillas-residuo fueron analizadas en seco, como harina, para lo cual las muestras de semillas-residuo de guayaba fueron deshidratadas a 70°C durante 6 horas (Fig.2). Posteriormente, molidas en un molino Goldenwall y tamizadas. (Fig.3)

Figura 2. Deshidratación de semillas-residuo.

Figura 3. Molienda y tamizado del semilla-residuo.

Con el objetivo de evaluar algunas propiedades tecnofuncionales de la semilla-residuo, y la influencia del tamaño de partícula, se obtuvieron lotes: harina: 0.058928 cm, residuos y fermentadas: 0.1016 cm y triturados: aprox. 0.1778 cm. (Fig.4)

Figura 4. Harina y residuo de la semilla-residuo.

Las propiedades tecnofuncionales evaluadas, fueron:

Determinación de color

Medir con colorímetro FRU® y se obtienen los valores de Luminosidad (L) y las coordenadas de color “a” y “b”.

Con los valores obtenidos de L, a y b, se determina el ángulo de matriz (AM) y el índice de saturación (IS) con las siguientes ecuaciones:

$$IS=\sqrt{a2}+b2 \qquad (1)$$

$$AM=tan-1\ b/a \qquad (2)$$

Determinación de la capacidad de absorción de agua (CAA)

Se pesan 2.5 gr de harina de guayaba y se suspende en 14 ml de agua, se agita por 30 minutos, enseguida se centrifuga a 5000 rpm por 30 minutos, se decanta y el gel o masa formado se pesa y la capacidad de absorción de agua se calcula con este peso. Los resultados se expresan en gramos de agua absorbida de materia seca (g/g m.s.), se calcula con la siguiente ecuación:

$$CAA=(m2-m1)/m1 \qquad (3)$$

Donde:
M1 (de la resta) = peso seco inicial (gr) de la muestra
M1= peso seco final (gr) de la muestra
M2= peso húmedo (gr) de la muestra

Determinación del indice de solubilidad en agua (ISA)

Se pesan 2.5 gr de harina de guayaba y se suspende en 14 ml de agua destilada, se agita por 30 minutos para homogeneizar la muestra, enseguida se centrifuga a 5000 rpm por 30 minutos. El líquido sobrenadante se decanta en capsulas de porcelana taradas para la determinación de sólidos, enseguida se lleva a secado en estufa a 100 ºC por 24 horas y por diferencia de pesos; se expresa como el porcentaje (%) de sólidos secos en 2.5 gr de muestra. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$ISA=(m2/m1)\times100 \qquad (4)$$

Donde:
M2= peso seco (gr) de la muestra posterior a la evaporación de agua.
M1= peso seco inicial (gr) de la muestra

Determinación de la capacidad de retención de aceite (CRAc)

Se pesa 1 gr de harina, se añaden 6 ml de aceite comestible de soya, se mantiene en agitación por 30 minutos. Posteriormente se centrifugó a 5000 rpm por 30 minutos, se mide el volumen en mililitros del aceite (sobrenadante). La diferencia entre el volumen inicial de aceite y el volumen recuperado corresponde a la capacidad de retención de aceite (CRAc) expresándose en ml/g de materia seca. Los cálculos se obtienen con la siguiente ecuación:

$$CRAc = (Vi-Vs) /Pm \qquad (5)$$

Donde:
Vi= volumen inicial del aceite (ml)
Vs= volumen del sobrenadante (ml)
Pm= peso de la muestra (gr)

Capacidad espumante

Se prepara una suspensión de harina, de 4 gr de harina con 40 ml de agua destilada, se agita 30 segundos, pasar a probeta y tomar volumen inicial. Posteriormente se homogeniza 2 minutos con batidora y se pasa a probeta para hacer medición de la espuma (ml), se toman las medidas necesarias en intervalos de 5 minutos, se utiliza la siguiente ecuación para obtener la capacidad espumante:

$$\text{Estabilidad de la espuma (\%)} = (\text{vol. Inicial-vol. Final}) /\text{vol. Inicial}*100 \qquad (6)$$

Capacidad emulsionante y estabilidad

Se preparan una solución de 1 gr de harina y 10 ml de agua destilada, y una emulsión de 1 gr de harina y 10 ml de aceite vegetal. Batir (homogenizar ambas, suspensión y emulsión) por 1 minuto, centrifugar por 10 minutos a 5000 rpm. Pasar a probeta el sobrenadante de aceite y medir el volumen final (ml)

El volumen final de aceite separado (Vf) representa la capacidad emulsionante y estabilidad de la muestra de harina.

Formación de gel

Hacer solución de 1 gr de ácido ascórbico y 100 ml de agua destilada. Otra solución de 2 gr de harina y 20 ml de agua destilada. Llevar a baño maría (90 °C) durante 15 minutos agitando constantemente. Una vez enfriada la solución, se aprecia la formación de gel y cambios de color o turbidez.

RESULTADOS

Se utilizó harina, obtenida de semillas de fruto fresco de guayaba, y de residuos de la industria, con en fin de obtener un analisis comparativo de sus propiedades. Las muestras evaluadas fueron lotes de tamaño de partícula diverso, así: L-6 R, LM2, L-9 R, LM-6 F y LM-5 F de 0.1016 cm; L-12 T y L-10 T de aprox. 0.1778 cm; L-3 HF de 0.058928 cm. Con el objetivo de comparar las propiedades evaluadas con su tamaño de partícula.

El contenido de Humedad de los lotes, entre 4 – 6 %; en el ángulo de matíz “Hue”, capacidad emulsificante y estabilidad de la emulsión, así como en la formación de gel, todas las harinas presentan valores similares. La Capacidad de retención de aceite, con respecto a la harina fresca, todas las otras harinas evaluadas, presentan un valor mayor; en el índice de saturación “Chroma”, existe diferencia de las harinas obtenidas de residuo con la de harina fresca, sin embargo, las harinas de triturados y fermentados, no presentan diferencia con respecto a la harina fresca; capacidad de absorción de agua e índice de solubilidad en agua, con respecto a la harina fresca, las harinas fermentada y triturados, no presentan diferencia, siendo la diferencia significativa es con las harinas de residuos, con un menor valor de este parámetro. La única harina que presenta capacidad de formación de espuma fue la harina fermentada.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros fisicoquímicos analizados a las distintas muestras de harinas de semilla-residuo de guayaba. Los resultados mostraron similitudes entre las harinas, aunque algunas, como la fermentada, destacaron por su capacidad espumante.
Estos resultados, permiten identificar posibles usos industriales de estos residuos y su aprovechamiento para reducir la contaminación que provoca su desecho.

Parámetro evaluado	**L-6 R**	**LM-2 R**	**L-9 R**	**L-3 HF**	**L-12 T**	**L-10 T**	**LM-6 F**	**LM-5 F**
Color (IS) “Chroma”	18.93	19.96	19.41	18.92	18.60	18.83	18.68	18.33
Color (AM) “Hue”	11.63	11.20	11.05	11.89	11.40	12.36	13.07	12.44
Capacidad de absorción de agua (CAA)	35.73	43.81	88.08	20.14	17.93	41.36	32.31	17.29
Índice de solubilidad en agua (ISA)	2.73	2.28	1.13	4.75	5.28	2.38	3.38	5.48
Capacidad de retención de aceite (CRA)	0.85	0.75	0.60	0.48	0.95	0.88	0.95	0.81
Formación de espuma (%)	0	0	0	1.21	2.43	0	5	10
Capacidad emulsionante y estabilidad (v.f.) (ml)	8.5	9.5	8.5	12	12	9.5	11	11
GEL (pH final)	3.55	3.11	3.44	3.04	2.98	3.11	3.04	2.98

Tabla 1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de harinas de semilla-residuo de guayaba.

CONCLUSIONES

La evaluación nos permitió ver que algunos de estos lotes sobresalieron en distintos parámetros fisicoquímicos y bromatológicos, respecto a determinación de color, en el ángulo de matiz “Hue” (AM) e índice de saturación “Chroma” (IS) todas las muestras presentan similitud, en capacidad de absorción de agua (CAA) el más sobresaliente fue L-9 R, en índice de absorción de agua (ISA) el más alto fue LM-5-F, el valor más alto para capacidad espumante fue LM-5 F, para la capacidad emulsionante y estabilidad destacó L-3 H.F., siendo la muestra L-6 R el valor más alto en formación de gel. Podemos concluir que la harina de este proyecto tiene potencial para la formulación de productos alimenticios, considerando el estudio de otros parámetros y su comportamiento en formulaciones varias. Además de tener una propuesta de utilización de un residuo, contribuir al medio ambiente disminuyendo un residuo contaminante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilera, Y.G. (2009). Harinas de leguminosas legumbres deshidratadas: caracterización nutricional y valoración de sus propiedades tecnofuncionales. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Agrícola, 274.

2. Ben-Othman, S., Jõudu, I. & Bhat, R. (2020). Review: Bioactives from Agri-Food Wastes: Present Insights and Future Challenges. Molecules 2020, 25, 510; doi:10.3390/molecules25030510

3. Campos, D., Gómez-García, R., Vilas-Boas, A., Madureira, A. & Pintado, M. (2020). Review: Management of Fruit Industrial By-Products—A Case Study on Circular Economy Approach. Molecules 2020, 25, 320; doi:10.3390/molecules25020320

4. Chel-Guerrero, L., Red-Flores, V.P., Betancur-Ancona, D., & Vila-Ortiz, G.D. (2002). Functional properties of flours and protein isolates from Phaseolus lunatus and Cannavalia ensiformis seeds. J. Agric. Food Chem., 50, 584- 5912.

5. Granito,M., Brito, Y., & Torres, A. (2007). Chemical composition, antioxidant capacity and functionality of raw and processed Phaseolus lunatus. Sci. Food Agric, 87, 2801-2809.

6. Patane, C., Lacoponi, E., & Raccuia, S.A. (2004). Physico-chemical characteristics, wáter absorption, soaking and cooking properties of some Sicilian populations of chickpea (Cicer arietinum L.). nt. J. Food Sci. Nutr., 55, 547- 554.

7. Silva-Vega, M., Bañuelos-Valenzuela, R., Muro-Reyes, A., Esparza-Ibarra, Edgar, & Delgadillo-Ruiz, L. (2017). Evaluación de semilla de guayaba (Psidium guajava L.) como alternativa en la nutrición ruminal. Abanico veterinario, 7(1), 26-35. https://doi.org/10.21929/abavet2017.71.2

8. Representación AGRICULTURA Michoacán. (18 de mayo de 2018). Gobierno de México. Obtenido de https://www.gob.mx/agricultura/michoacan/articulos/produccion-de-guayaba-en-michoacan?idiom=es

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y POTENCIAL ALIMENTARIO DE BUGAMBILIA FUCSIA (*Bougainvillea Glabra*)

Jennifer Reyes Tapia[1], Yuliza Guadalupe Morales Herrejón[1], Consuelo de Jesús Cortés-Penagos[1], Liliana Márquez Benavides[2], Berenice Yahuaca-Juárez[1]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología, [2] Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
berenice.yahuaca@umich.mx

RESUMEN

La bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*) es una flor de interés en el ámbito alimentario debido a sus propiedades benéficas y su potencial como fuente de compuestos bioactivos y funcionales. En particular, la variedad de color fucsia puede ser aplicada en la formulación de productos funcionales y nutracéuticos. En este estudio, el objetivo fue determinar las propiedades de color y el contenido de fibra con el fin de explorar su posible aplicación en la industria alimentaria y nutracéutica. Las flores de bugambilia fueron desinfectadas y enjuague con agua destilada. Posteriormente, se deshidrataron a 40°C por 8 hrs. Las muestras secas fueron pulverizadas y tamizadas. Se determinó el perfil de color mediante colorimetría CIELAB (L*, a*, b*), y el contenido de fibra total se cuantificó mediante el método enzimático-gravimétrico AOAC 985.29. Los resultados mostraron que la bugambilia fucsia conserva un color intenso tras la deshidratación, con valores mayores en la coordenada de color a*, lo que indica una fuerte tonalidad rojiza. El contenido de fibra total fue significativo, lo que sugiere que su incorporación en productos alimenticios podría contribuir a mejorar la ingesta de fibra dietética. La estabilidad del color es un factor favorable para su uso en formulaciones nutracéuticas y alimentarias. En conclusión, la bugambilia fucsia destaca por su alto contenido de fibra y la estabilidad de su color. Estos hallazgos respaldan su potencial aplicación en la industria alimentaria, ya sea como ingrediente funcional o como colorante natural.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, la industria alimentaria se ha transformado significativamente debido a la demanda de productos saludables, naturales y funcionales correspondiente a la exigencia de los consumidores hacia una mayor transparencia, naturalidad y sostenibilidad en los productos que consumen, surgen los alimentos con etiquetas limpias (Clean label) que promueven la formulación de alimentos con ingredientes simples, naturales, sin aditivos sintéticos ni conservadores artificiales (Asioli et al., 2017). Lo anterior ha conllevado al estudio de materias primas de origen vegetal con propiedades nutricionales y funcionales, que cumplan con los criterios de calidad y que aporten un beneficio a la salud del consumidor (Granato et al., 2017).

En este contexto, una alternativa de matriz alimentaria como ingrediente funcional son las flores comestibles, las cuales además de ser atractivas sensorialmente representan una alternativa sostenible para diversificar la dieta aprovechando los recursos vegetales no convencionales. En este sentido y alineado con los objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) se puede contribuir a fortalecer sistemas alimentarios resilientes y circulares. Específicamente, el ODS 2: Hambre Cero que promueve el acceso universal a alimentos nutritivos y suficientes, en tanto que el ODS 12: Producción y Consumo responsables promueven el uso eficiente de recursos y la reducción del desperdicio alimentario. Incorporar ingredientes vegetales como la bugambilia puede ampliar la oferta de alimentos funcionales, reducir la dependencia de aditivos sintéticos e impulsar una producción local sostenible (FAO, 2023).

La bugambilia (*Bougainvillea glabra*), es una planta con valor ornamental y es ampliamente cultivada en México. Popularmente se ha empleado en la medicina tradicional por sus propiedades para aliviar síntomas respiratorios como tos, asma, bronquitis, esto debido a su contenido de compuestos bioactivos con características terapéuticas (SEMARNAT, 2021). Diversas investigaciones, han

identificado fitoquímicos en sus flores y hojas, entre ellos los flavonoides (quercetina y kaempferol), saponinas, taninos, alcaloides y en menor concentración aceites esenciales y ácidos fenólicos (Abarca-Vargas y Petricevich, 2018). Los flavonoides poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, en tanto que las saponinas tienen actividad expectorante y moduladora del sistema inmunológico. Los taninos tienen efectos astringentes y antivirales, y algunos alcaloides contenidos en pequeñas concentraciones pueden tener actividad broncodilatadora y antitusiva, lo que respalda el uso tradicional de la bugambilia en infusiones y jarabes para el tratamiento de enfermedades de las vías respiratorias.

En la alimentación, la bugambilia no ha sido mayormente investigada. Sin embargo, es importante destacar que la variedad fucsia destaca por su pigmentación, atribuida principalmente a la presencia de betalaínas (Sehrawat y Soni, 2019). Las betalaínas son pigmentos que se constituyen en dos grupos estructurales, las betacianinas que dan coloraciones rojo-violeta y las betaxantinas con coloraciones amarillo-naranja, ambos grupos se sintetizan a partir del aminoácido tirosina y su componente principal es el ácido betalámico (Román et al., 2014) el cual actúa como cromóforo. Su aplicación como pigmento natural es una alternativa al uso de colorantes sintéticos, los cuales han sido relacionados con efectos adversos a la salud humana (Delgado-Vargas & Paredes-López, 2003). Además, las betalaínas son pigmentos vacuolares hidrosolubles (García-Cruz et al., 2012), lo que facilitaría su incorporación a productos alimenticios como bebidas, gelatinas, yogures, infusiones, coberturas, panificación, entre otros. También es importante mencionar que además de contener betalaínas, contiene polifenoles otorgándole a la bugambilia capacidad antioxidante.

Por otra parte, cabe destacar que la flor de bugambilia posee un alto contenido de fibra dietética, lo cual la convierte en una posibilidad importante para utilizarse como ingrediente funcional enriqueciendo alimentos procesados y al mismo tiempo actuar como colorante natural, reduciendo así el uso de pigmentantes sintéticos. La fibra dietética, particularmente en su forma insoluble juega un papel determinante en la regulación del tránsito intestinal, la prevención del estreñimiento, además de promover un estado de saciedad en el organismo, lo cual contribuye al control del peso corporal y la reducción del riesgo de enfermedades metabólicas (Anderson et al., 2009). En referencia a la fracción soluble de la fibra, esta puede formar geles en el tracto digestivo, ayudando al control de la glucosa y colesterol sanguíneo (Dhingra et al., 2012).

La incorporación de fibra dietaria en alimentos es una tendencia actual hacia la elaboración de productos que correspondan a etiquetas limpias, que aporten funcionalidad y que sean sostenibles. Por lo tanto, el aprovechamiento de materias primas florales como la bugambilia puede representar una alternativa para desarrollar alimentos funcionales impactando además en los ODS, específicamente aquellos que están relacionados con la salud, la seguridad alimentaria y el consumo responsable.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades de color y el contenido de fibra dietaria en la flor de bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*).

PARTE EXPERIMENTAL

Material de estudio. Se colectaron flores de Bugambilia de color fucsia (*Bougainvillea glabra*) cultivadas en la localidad de San Juanito Itzícuaro, perteneciente al municipio de Morelia en el estado de Michoacán, México. Se seleccionaron las brácteas, las cuales fueron desinfectadas con una solución yodada y lavadas con agua destilada.

Posteriormente, las brácteas se deshidrataron a 40°C por 8 hrs. Las muestras se deshidrataron en un deshidratador de alimentos Hamilton Beach®. El material deshidratado se pulverizó en un molino eléctrico GoldeWall®. El pulverizado obtenido se colocó en bolsas selladas al vacío.

Variables de estudio. Las variables de estudio fueron color y fibra dietaria (FD). Las metodologías utilizadas se describen a continuación:

Determinación de color. Para la determinación del color se llevó a cabo la metodología por colorimetría utilizando un colorímetro FRU WR10QC. Se obtuvo el valor de luminosidad (L) que mide la blancura de un color y varía de 0 (negro) a 100 (blanco), además de las coordenadas de color a (rojo positivo y verde negativo) y b (amarillo positivo y azul negativo). Los valores a y b se usaron para calcular el ángulo de matiz (AM) y el índice de saturación (IS), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\textbf{Ángulo de Matiz}(\textbf{AM}) = \textbf{arctan}\ \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{a}}$$

$$\textbf{Índice de Saturación}(\textbf{IS}) = \sqrt{(\mathbf{a^2} + \mathbf{b^2}}$$

Los datos de cada medida fueron el promedio de medidas por triplicado en puntos equidistantes del pulverizado.

Determinación del contenido de Fibra Dietaria Total (FDT). El contenido de FDT se cuantificó mediante el método enzimático-gravimétrico AOAC 985.29. El método se basa en digerir las proteínas e hidratos de carbono con tres enzimas: alfa amilasa, proteasa y amiloglucosidasa (marca Sigma-Aldrich®). Se colocó 1 g de la muestra, 40 ml de solución tampón MES/TRIS y 50 µL de solución de α-amilasa en un vaso de precipitado cubierto de papel aluminio, se incubó a 95 °C/ 30 minutos y se enfrió a 60 °C, posteriormente se añadieron 50 µL de solución de proteasa y se incubó a 60 °C/30 minutos para ajustar el pH a un valor de 4.0-4.7, finalmente se añadieron 150 µL de solución de amiloglucosidasa y se incubó a 60 °C/30 minutos. Posteriormente se realizó la precipitación de la fibra dietaria total agregando 220 ml de etanol 95 %/ 60 °C y se dejó reposar por 1 hora, a continuación, se filtró el contenido con papel filtro de poro cerrado. La FDT, se calcula previo descuento del remanente de cenizas y proteína siguiendo los métodos descritos anteriormente.

FDT =((Rmuestra-Pproteínas-Pcenizas-B))/M (100)

Donde:
Rmuestra: residuo de la muestra en gramos.
Pproteínas: peso de la proteína en gramos.
Pcenizas: peso de cenizas en gramos.
B: blanco.
M: peso de la muestra en gramos.

Diseño y Análisis Estadístico. Se llevó a cabo un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico JMP11 y comparados mediante un análisis de varianza de una vía, las medias fueron comparadas con una prueba de Tukey con un nivel de significancia P≤0.05.

RESULTADOS

La bugambilia presenta una gran diversidad de colores que van del blanco al fucsia, proporcionándole atractivo visual, razón por la que se ha conservado a lo largo del tiempo en su uso ornamental. No obstante, además de su atractivo estético, en el caso de la bugambilia fucsia, su contenido en betalaínas, pigmentos hidrosolubles que le proporcionan su color característico (Carrera-Rodríguez, 2022) representan una oportunidad de obtener pigmentos vegetales para incorporarse en formulaciones alimenticias reemplazando el uso de colorantes sintéticos.

Los resultados obtenidos en la determinación de color a través de las coordenadas de color (L, a, b), así como su ángulo de matiz e índice de saturación en los pulverizados de las brácteas de la bugambilia fucsia se presentan en la Tabla 1. Con respecto al valor de la luminosidad (L), las brácteas

en estado fresco presentan un valor de 47.4 disminuyendo en 12 unidades cuando estas son deshidratadas y pulverizadas (35.6), estos valores son indicativos de que, en fresco, el material de estudio es más brillante y claro con respecto al pulverizado. En cuanto a la coordenada de color a (verde-rojo) ambas muestras presentaron valores positivos, siendo más alto en la bugambilia fresca en 1.8 unidades en comparación a la pulverizada, cabe indicar que valores positivos de a corresponden a tonalidades rojizas, lo cual es característico de la bugambilia en estudio debido a las betalaínas presentes en las brácteas. En referencia a la coordenada de color b*(azul-amarillo), los valores se muestran en diferentes ejes, siendo la bugambilia fresca de valor positivo (0,63), indicando tonalidades amarillas, en tanto que las brácteas deshidratadas presentan un valor negativo (-0.43) referido a tonos azules. Esta diferencia en la coordenada de color b, puede hacer énfasis en el efecto de la temperatura y el tiempo utilizados durante la deshidratación de la muestra.

Tabla 1. Determinación de color en las brácteas de bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*).

Brácteas de bugambilia fucsia	L	a	b	AM	IS
Fresca (Control)	47,4±0,445	15,9±1,108	0,63±0,021	0,039	15,91
Deshidratada y pulverizada	35,6±0,351	14,1±0,548	-0,43±0,201	-1,18	14,18

Los valores corresponden a las medias ± = desviación estándar. Prueba de Tukey (α=0.05).

Por otra parte, el AM y el IS de los materiales estudiados (Tabla 1) indican un valor negativo de AM para el material deshidratado (-1.18) con respecto al control (0.039). Es importante señalar un AM negativo señala que el color se desplaza en dirección opuesta a la positiva dentro del círculo de color. En el sistema Lab, el AM se mide a partir del eje +a (rojo), por lo tanto, un AM negativo señala una inclinación hacia el lado opuesto, en dirección al verde en el eje -a y azul -b. Lo anterior puede interpretarse en el sentido de que las coloraciones emitidas por el AM se encuentran mayoritariamente hacia las tonalidades azules. Por otra parte, el IS fue de 15.92 en la muestra control (fresca), disminuyendo en la muestra deshidratada (14.18).

En la Figura 1, se muestra con base en el AM y el IS, el espacio de color en el que se ubican tanto las brácteas en estado fresco como las deshidratadas. Es posible observar ese cambio en la coloración cuando las brácteas son llevadas a la temperatura y tiempo de deshidratación. Cabe señalar además, que el IS hace referencia a la intensidad y pureza de un color, el rango de valores va de 0 a 100 % (de menor saturación a máxima saturación o pureza).

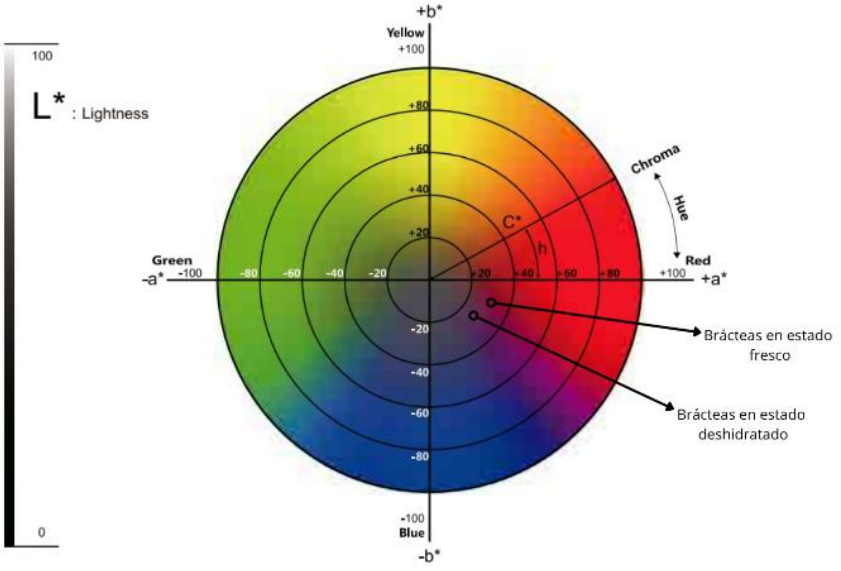


Figura 1. Representación gráfica del comportamiento de las brácteas de bugambilia frescas y pulverizadas con respecto al AM (Hue) e IS (Chroma).
El IS obtenido en ambas muestras analizadas indica una baja saturación de color, en tanto más cercano sea al cero, se interpreta como grisáceo (mezclado con blanco o negro) o descolorido.

Existen algunos factores que pueden afectar la estabilidad de las betalaínas, entre ellos destacan el pH, estos compuestos son estables a pH de 3 a 7, encontrando su mayor estabilidad entre 4 y 6, por lo que pueden ser utilizados en alimentos que contengan una acidez baja. Altas temperaturas pueden promover la degradación de las betalaínas, sin embargo, se identifican comúnmente como moléculas resistentes al calor con pérdida de estabilidad cuando se prolonga el periodo de calentamiento. Entre otros factores destacan la actividad de agua, la luz, oxígeno, iones metálicos, estructura y composición y antioxidantes (Meza-Carhuaricra, 2023).

Finalmente, en la tabla 2 se encuentran los resultados correspondientes a la fibra dietética total (FDT) encontrada en las brácteas de bugambilia fucsia. La fibra soluble se encontró en un porcentaje de 0,81%, reflejando una baja de presencia de compuestos como pectinas o β-glucanos, comunes en materiales vegetales, sin embargo, en el caso de la bugambila estos compuestos no son predominantes. Lo anterior a diferencia de la fibra insoluble encontrada (72,31%), la cual representa la mayor proporción y se relaciona directamente con los componentes estructurales de la planta, tales como hemicelulosa, celulosa y lignina, componentes de la pared celular vegetal aportando rigidez a los tejidos vegetales (Escudero-Álvarez, et. al, 2006).

Tabla 2. Contenido de FDT en las brácteas de bugambilia fucsia

	Pulverizado de brácteas de bugambilia fucsia
Fibra soluble	0,81%
Fibra insoluble	72,31%
Fibra total	73,12%

Estos hallazgos son respaldados por Ramesh, et. al., 2006, al señalar una composición predominante en celulosa, hemicelulosa y lignina. Por último, El contenido de fibra total fue significativo (73.12 %), lo que sugiere que su incorporación en productos alimenticios podría contribuir a mejorar la ingesta de fibra dietética.

CONCLUSIONES

En conclusión, la bugambilia fucsia presentó un contenido importante de fibra y un color atractivo propio de la bugambilia fucsia, el cual se mantuvo relativamente estable a los procesos de preparación de las brácteas. Estos resultados respaldan su potencial aplicación en la industria alimentaria, ya sea como ingrediente funcional o como colorante natural. Sin embargo, se requieren estudios toxicológicos de seguridad, un perfil nutricional completo, evaluación sensorial y posibles aplicaciones industriales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca-Vargas, R., & Petricevich, V. L. (2018). Bougainvillea Genus: A Review on Phytochemistry, Pharmacology, and Toxicology. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2018, 1–17. doi:10.1155/2018/9070927
2. Anderson, J. W., Baird, P., Davis Jr, R. H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters V. & Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. Nutrition Reviews, 67(4), 188–205. https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x
3. Asioli, D., Aschemann‐Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the "clean label" trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. Food Research International, 99, 58–71. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022
4. Carrera-Rodríguez, A.G., 2022. Evaluación de estabilidad y aceptación de productos cosméticos elaborados a partir del colorante extraído de la bouganvilia (*Bougainvillea spp*) color fucsia. Tesis de Licenciatura en Química Farmacéutica. Universidad de San Carlos Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/Tesis/QF1565.pdf
5. Delgado-Vargas, F., & Paredes-López, O. (2003). Natural colorants for food and nutraceutical uses. CRC Press.
6. Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. Journal of Food Science and Technology, 49(3), 255–266. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5
7. Escudero Álvarez, E., & González Sánchez, P. (2006). La fibra dietética. Nutrición Hospitalaria, 61-72.
8. FAO. 2023. Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators 2023. Rome. ISBN 978-92-5-138013-0https://doi.org/10.4060/cc7088en.
9. García-Cruz, Leticia, Salinas-Moreno, Yolanda, & Valle-Guadarrama, Salvador. (2012). Betalaínas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en pitaya de mayo (Stenocereus griseus H.). Revista fitotecnia mexicana, 35(spe5), 01-05. Recuperado en 29 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000500003&lng=es&tlng=es.
10. Granato, D.; Sávio Nunes, D.; Barba F.J., 2017. An integrated strategy between food chemistry, biology, nutrition, pharmacology, and statistics in the development of functional foods: A proposal. Trends in Food Science & Technology. Volume 62, Pp.13-22, ISSN 0924-2244. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.010
11. Meza-Carhauaricra, K.J., 2023. Degradación cinética del color durante el almacenamiento de caramelos duros con adición de colorante de la flor de buganvilla (*Bougainvillea spp*.). Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Centro de Perú. Facultad de Ingenierías en Industrias Alimentarias. URI: http://hdl.handle.net/20.500.12894/10241
12. Roman, M.; Aniceto, Ch.; Pineda, S.; Alatriste, I. & Rivera, V., 2014. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook T-VI. Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. Septiembre 11-12, 2014. file:///C:/Users/yajua/Dropbox/PC%20(2)/Downloads/Dialnet-CienciasDeLaIngenieriaYTecnologiaHandbookTVI-563103%20(1).pdfRui Tang, Yong He, Kai Fan, 2023. Recent advances in stability improvement of anthocyanins by efficient methods and its application in food intelligent packaging: A review.

13. Food Bioscience. Volume 56, 103164, ISSN 2212-4292, https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103164. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223008155)
14. SEMARNAT, 2021. Plantas medicinales de México. Consultado el 17 de mayo del 2025. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/plantas-medicinales-de-mexico
15. Sehrawat, S., Soni, H., 2019. Phytopharmacology Profile of Bougainvillea glabra: An Overview. Br J Med Health Res. 2019;6(05). ISSN: 2394-2967

EFECTOS DEL PRASEODIMIO EN LA ALTURA DE PLANTA Y NÚMERO DE FLORES DE PENSAMIENTO MINI (*Viola Cornuta*)

Jessica Alejandra Roldán-García, Y. Leticia Fernández-Pavía, Fernando Carlos Gómez-Merino, María Guadalupe Peralta-Sánchez, Fresia Pacheco-Sangerman, Libia Iris Trejo-Téllez

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México, México. C. P. 56264.
roldan.jessica@colpos.mx

RESUMEN

Los elementos de tierras raras han ganado una creciente atención en la comunidad científica debido a su impacto significativo en los sistemas biológicos, particularmente en plantas superiores. Estos elementos, que incluyen el lantano (La), cerio (Ce), neodimio (Nd), gadolinio (Gd), terbio (Tb) e iterbio (Yb), praseodimio (Pr), entre otros, pueden tener efectos tanto estimulantes como inhibidores en el crecimiento y desarrollo de las plantas, dependiendo de su concentración y la especie vegetal en cuestión. En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos del Pr en pensamiento mini (*Viola cornuta*). Esta especie es una de las flores comestibles más populares producidas como plantas de jardín. Por tanto, se establecieron plántulas de pensamiento mini en macetas de 1.3 L de capacidad con sustrato (turba, fibra de coco, tierra negra y tepojal; 1:1:1:1; v:v:v:v). Se evaluaron concentraciones de Pr (0, 25, 50, 75 y 100 µM) aplicadas con la solución nutritiva empleada para el riego. Después de 62 d de tratamiento se evaluó la altura de las plantas y el número de flores. Los datos obtenidos fueron analizados con el software SAS, realizando análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$). La altura de planta fue mayor en el tratamiento con 25 µM Pr, superando al tratamiento 100 µM Pr en 9.5%. Las plantas tratadas con 25 µM Pr fueron 3.5% más altas que plantas testigo; no obstante, esta diferencia no es significativa. Por otro lado, el número promedio de flores por planta osciló entre 12.50 y 14.95, sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Se concluye que el Pr en altas concentraciones (100 µM Pr) inhibe el crecimiento de las plantas de pensamiento mini; por el contrario, no tiene efectos en el número de flores.

INTRODUCCIÓN

El género *Viola*, perteneciente a la familia Violaceae es nativo de Europa y Asia occidental y cuenta con 265 especies. Dentro de ellas, se encuentra el pensamiento mini (*Viola cornuta*) que es una de las especies ornamentales bianuales más usadas como elemento decorativo en jardines y bordos, además de ser empleada en el arte culinario dado que sus flores son coloridas. Además, se consideran flores comestibles en ciertas culturas (Moliner *et al*., 2019). Además de la calidad nutricional y las propiedades funcionales, el consumidor busca nuevas emociones, y las flores comestibles cumplen con estos requisitos, proporcionando nuevos y atractivos colores, texturas y vitalidad a las comidas; además del "factor glam", pueden constituir una nueva fuente de compuestos bioactivos (González-Barrio *et al*., 2018).

Si bien existe importante información relacionada con aspectos morfológicos y sobre soluciones nutritivas y conductividad eléctrica para la producción de pensamiento mini en invernadero, no existen estudios que hayan abordado el uso de bioestimulantes en su producción. Los bioestimulantes son sustancias de diversos orígenes pueden promover crecimiento, eficiencia en la absorción y utilización de nutrimentos, y calidad; además de incrementar la tolerancia vegetal a factores de estrés abiótico (du Jardin, 2015).

Dentro del grupo de bioestimulantes inorgánicos del metabolismo vegetal se encuentra el praseodimio (Pr), elemento del grupo de los lantánidos. Este estudio tiene como objetivo evaluar los efectos de diferentes concentraciones de Pr en la altura de planta y número de flores en pensamiento mini, con el fin de determinar su potencial aplicación como bioestimulante en la producción de esta especie ornamental y comestible. Los resultados obtenidos podrían proporcionar una base científica

para el desarrollo de nuevas estrategias de manejo en la producción de plantas ornamentales, contribuyendo a mejorar su calidad y rendimiento.

TEORÍA

Bioestimulante vegetal

El Consejo Europeo de la Industria de Bioestimulantes (EBIC) define a un bioestimulante como la sustancia o microorganismo cuya función, al aplicarse a las plantas o a la rizosfera, es estimular los procesos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de los cultivos (Quille *et al*., 2025). Un bioestimulante vegetal "es cualquier sustancia o microorganismo aplicado a las plantas con el objetivo de mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los rasgos de calidad de los cultivos, independientemente de su contenido en nutrientes" (du Jardin, 2015).

Du Jardin, clasificó los bioestimulantes vegetales según su origen en: ácidos húmicos y fúlvicos, hidrolizados de proteínas y otros compuestos que contienen N, extractos de algas y productos botánicos, quitosano y otros biopolímeros, compuestos inorgánicos, hongos y bacterias beneficiosos (Quille *et al*., 2025).

Elementos de las Tierras Raras (REE)

Los elementos de tierras raras (REE) son una familia de 17 elementos químicos formados por escandio itrio (ubicados en el grupo III de la tabla periódica) y la serie de los lantánidos (desde el lantano hasta el lutecio) (Gómez-Navor *et al*., 2021). Los REE comparten características físicas y químicas similares y muchos de los elementos de este grupo están clasificado como bioestimulantes inorgánicos (López-Rueda *et al*., 2022). Son suministrados en concentraciones adecuadas a las plantas a través del agua de riego, solución nutritiva o aplicación foliar, se ha demostrado que el Nd y otros REE tienen efectos beneficiosos en una variedad de cultivos, entre las respuestas positivas de éstos se incluyen mayor germinación, promoción del crecimiento, mejora del metabolismo y mayor rendimiento de manera hormética (Ramírez-Antonio *et al*., 2023).

Lantánidos

La serie de elementos químicos lantánidos o lantanoides (Ln) abarca 15 elementos en el bloque f del período seis en la tabla periódica, con números atómicos (Z) 57–71, desde el lantano (La) hasta el lutecio (Lu), incluyendo: cerio (Ce), disprosio (Dy), erbio (Er), europio (Eu), gadolinio (Gd), holmio (Ho), neodimio (Nd), praseodimio (Pr), prometio (Pm), samario (Sm), terbio (Tb), tulio (Tm) e iterbio (Yb) (Tao *et al*., 2022). En agricultura, las plantas tratadas con bajas concentraciones de La o Ce muestran un rendimiento mejorado, con evidentes efectos dosis-respuesta horméticos. Otros lantánidos como Pr, Nd, Eu y Gd también han demostrado efectos positivos, pero han sido menos investigados en plantas (Gómez-Merino *et al*., 2023).

Praseodimio

El praseodimio (Pr) es un elemento químico con número atómico 59 que ocupa el tercer lugar en la serie de los lantánidos. Se ubica estratégicamente en el sexto período de la tabla periódica, entre el cerio y el neodimio. Considerado uno de los metales de tierras raras, comparte características químicas con los demás elementos de este grupo, siendo +3 su estado de oxidación más estable (Sáez-Puche, 2019).

Existen pocos estudios sobre los efectos del Pr en las plantas (Carbajal-Vázquez *et al*., 2025). El Pr aumentó la tolerancia al Cd del maíz al regular las actividades enzimáticas en las vías de regeneración y biosintéticas del ascorbato y glutatión (Zhu e*t al*., 2021). Por otro lado, se han investigado los efectos del nitrato de praseodimio [$Pr(NO_3)_3$] en la capacidad antioxidante y el balance hídrico de las flores de corte de *Lilium longiflorum*. Sus resultados mostraron que el $Pr(NO_3)_3$ aumentó las actividades de las enzimas peroxidasa (POD), la catalasa (CAT) y de cuatro más que son parte del ciclo ascorbato-glutatión, la tasa de cambio de peso de biomasa fresca y el valor del balance hídrico, así como el contenido de osmolitos (azúcares solubles y prolina), al tiempo que

redujo el contenido de malondialdehído (MDA) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), lo que se traduce en una prolongación de la vida en florero (Zhang *et al*., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

El experimento se realizó en un invernadero perteneciente al Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, localizado a 2250 m de altitud, 19° 27' 40" latitud norte y 98° 54' 32" longitud oeste, en Montecillo, Estado de México, México.

Se trasplantaron plántulas de viola mini (*Viola cornuta*) en macetas de plástico de 1.3 L, empleando como sustrato turba, fibra de coco, tierra negra y tepojal (1:1:1:1; v:v:v:v).

A partir del trasplante, se dio inicio con el riego, hasta el periodo de cosecha. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, cada tratamiento tuvo 20 repeticiones. Se evaluaron concentraciones de Pr (0, 25, 50, 75 y 100 µM) aplicadas con la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 50 %, empleada para el riego. La fuente empleada de Pr fue $PrCl_3$ (Sigma Aldrich). La unidad experimental fue una maceta.

Al finalizar la cosecha se realizaron las siguientes determinaciones. La altura de planta se midió desde la base del sustrato hasta la parte superior de las hojas empleando un flexómetro y se contabilizó el número de flores de cada unidad experimental.

Se hizo un análisis de varianza y prueba de comparación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$), con el software estadístico Statistical Analysis System versión 9.3 (SAS Institute, 2011).

RESULTADOS

La mayor altura de planta se registró en plantas tratadas con 25 µM Pr (14.77 cm); no obstante, este tratamiento no fue diferente al tratamiento testigo. Por otra parte, se observó que el tratamiento 100 µM Pr presentó la menor altura de planta (13.49 cm) que fue diferente a los tratamientos 0, 25 y 50 µM Pr; en específico el tratamiento 25 µM Pr lo superó en 9.5 % (**Figura 1**). Estos resultados sugieren que concentraciones moderadas de lantánidos pueden incrementar la altura de planta; mientras que, concentraciones altas como 100 µM resultan inhibitorias para el crecimiento (Constantin *et al*., 2025).

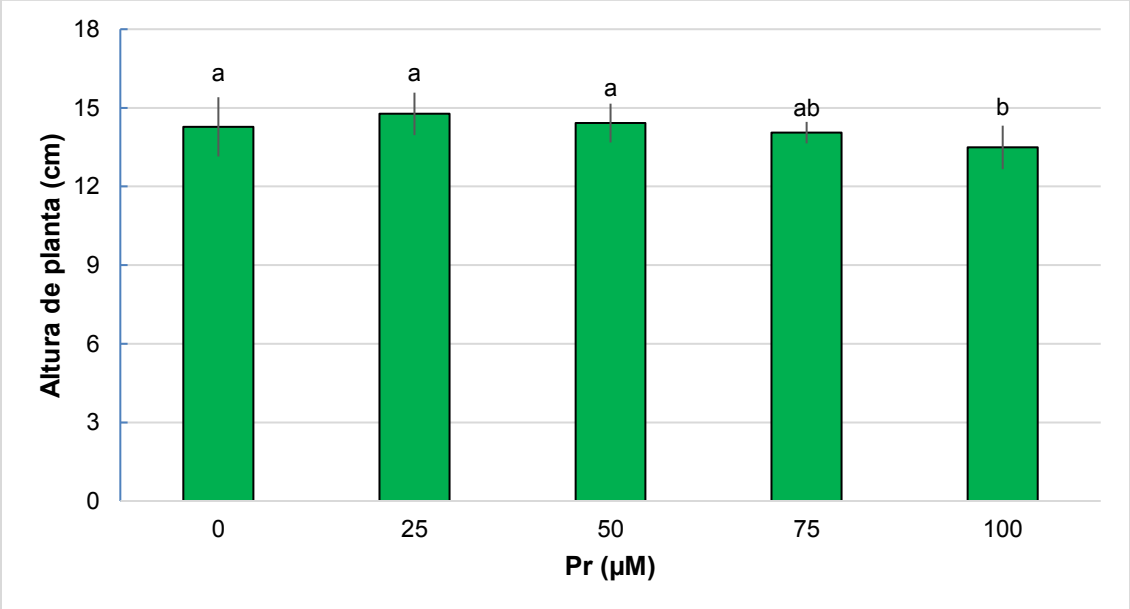


Figura 1. Efectos del praseodimio en la altura de plantas de viola mini (*Viola cornuta*). Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

En cuanto al número promedio de flores por planta, los valores oscilaron entre 12.50 y 14.95, siendo el tratamiento con 0 µM Pr el que presentó el mayor número de flores. No obstante, el análisis estadístico mostró que no existen diferencias significativas entre tratamientos (**Figura 2**). Estos resultados difieren de los reportados por García-Jiménez *et al*. (2017) en pimiento morrón de las variedades Sven, Yolo Wonder y Zidenka, donde el tratamiento con 10 µM La incrementó significativamente el número de botones florales.

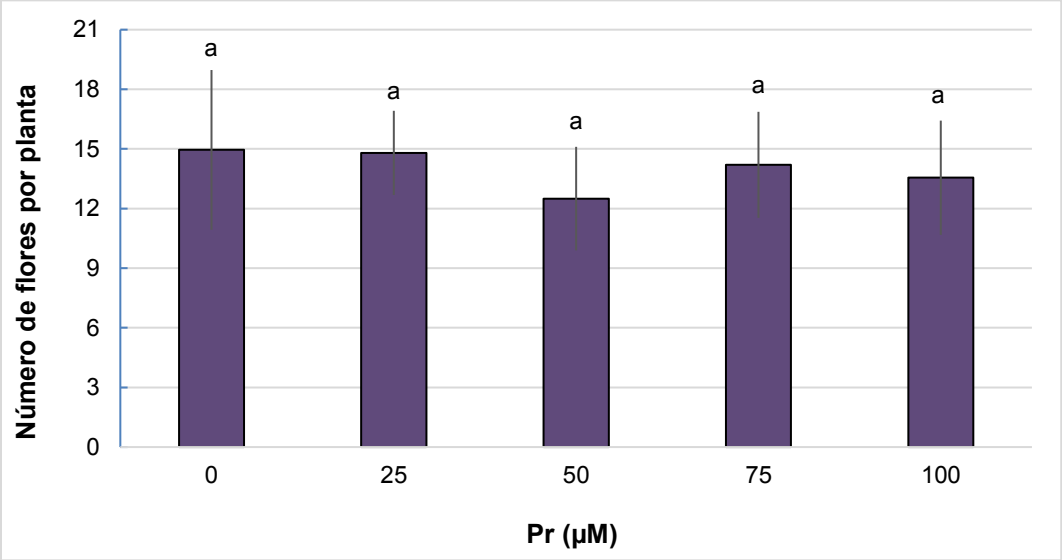


Figura 2. Efectos del praseodimio en el número de flores de viola mini (*Viola cornuta*). Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Se concluye que el Pr en altas concentraciones (100 µM) inhibe el crecimiento en altura de plantas de pensamiento mini, lo que podría estar asociado con efectos fitotóxicos o alteraciones en la homeostasis nutrimental. Por el contrario, el Pr no tuvo efectos en el número de flores, lo que sugiere que la floración en esta especie es menos sensible a la concentración de este elemento bajo las condiciones evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Steiner, “The universal nutrient solution”. In: *6th International Congress on Soilless Culture*, (Wageningen, The Netherlands,1984) pp. 633-650.
2. A. García-Jiménez, F. C. Gómez-Merino, O. Tejeda-Sartorius, L. I. Trejo-Téllez, “Lanthanum affects bell pepper seedling quality depending on the genotype and time of exposure by differentially modifying plant height, stem diameter and concentrations of chlorophylls, sugars, amino acids, and proteins”, Front. Plant Sci., Vol. 8, 2017, https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308
3. C. Moliner, L. Barros, M. I. Dias, I. Reigada, I. C. F. R. Ferreira, V. López, E. Langa, C. G. Rincón, “*Viola cornuta* y *Viola* × *wittrockiana*: Phenolic compounds, antioxidant and neuroprotective activities on *Caenorhabditis elegans”*, J. Food Drug. Anal., Vol. 27, 4, 2019, pp. 849-859. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2019.05.005
4. C. Zhang, X. Zhang, C. Shan, “Effect of praseodymium on the postharvest quality of *Lilium longiflorum* cut flowers*”,* New Zealand J. Crop and Hort. Sci., Vol. 51, 4, 2023, pp. 683-693. https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2068619
5. F. C. Gómez-Merino, L. F. Gómez-Trejo, R. Ruvalcaba-Ramírez, L. I. Trejo-Téllez, “Lanthanides as Beneficial Elements for Plants”, in *Beneficial Chemical Elements of Plants*

(John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, NJ, 2023), Chapter 15, pp. 349-369. https://doi.org/10.1002/9781119691419.ch15
6. I. López-Rueda, L. I. Trejo-Téllez, F.C. Gómez-Merino, "Bioestimulación con neodimio en la germinación de semillas y el crecimiento inicial de plántulas de lechuga cv. Rhodenas", ECTI Experiencias Científicas, Tecnológicas y de Innovación, Vol. 2, 1, 2022, pp. 1-6.
7. M. Constantin, M. F. Chioncel, L. Petrescu, C. O. Vrancianu, M. Paun, R.-E. Cristian, M. Sidoroff, M. V. Dionisie, M. C. Chifiriuc, "From rock to living systems: Lanthanides toxicity and biological interactions", Ecotoxicol. Environ. Saf., Vol. 289, 2025, 117494. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117494
8. P. Quille, J, Kacprzyk, S. O'Connell, C. K. Y. Ng, "Reducing fertiliser inputs: Plant biostimulants as an emerging strategy to improve nutrient use efficiency", Discov. Sustain., Vol. 6, 128, 2025. https://doi.org/10.1007/s43621-025-00910-w
9. Q. Zhu, Y. Li, S. Gao, C. Shan, "Praseodymium enhanced the tolerance of maize seedlings subjected to cadmium stress by up-regulating the enzymes in the regeneration and biosynthetic pathways of ascorbate and glutathione", Plant Soil Environ., Vol. 67, 11, 2021, pp. 633-642. https://doi.org/10.17221/217/2021-PSE
10. SAS Institute Inc. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA. 2011.
11. T. Gómez-Navor, F. C. Gómez-Merino, G. Alcántar-González, Y. L. Fernández-Pavía, L. I. Trejo-Téllez, "Cerium (Ce) affects the phenological cycle and the quality of tulip (*Tulipa gesneriana* L.)", AgroProductividad, Vol. 14, 4, 2021, pp. 59-63.
12. P. du Jardin, "Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation", Sci. Hort., Vol. 196, 2015, pp. 3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021
13. R. González-Barrio, M. J. Periago, C. Luna-Recio, F. J. Garcia-Alonso, I. Navarro-González, "Chemical composition of the edible flowers, pansy (*Viola wittrockiana*) and snapdragon (*Antirrhinum majus*) as new sources of bioactive compounds", Food Chem., Vol. *252*, 2018, pp. 373-380. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.102
14. R. Sáez Puche, "Z = 59, praseodimio, Pr. El gemelo verde", An. R. Soc. Esp. Quím., Vol. *2*, 2019, pp. 121-121.
15. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, J. V. Hidalgo-Contreras, "Application and effects of rare earth elements in agricultural production systems", AgroProductividad, Vol. 18, 1, 2025, pp. 205-214. https://doi.org/10.32854/agrop.v18i1.3218
16. V. J. Ramírez-Antonio, L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, J. V. Hidalgo-Contreras, "Neodymium Stimulates growth, nutrient concentration, and metabolism in sugarcane in hydroponics", SugarTech, Vol. *25*, 6, 2023, pp. 1385-1395. https://doi.org/10.1007/s12355-023-01283-y
17. Y. Tao, L. Shen, C. Feng, R. Yang, J. Qu, H. Ju, Y. Zhang, "Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review", Environ. Pollut., Vol. 298, 2022, 118540. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118540

EFECTO DEL SECADO DE CAFÉ CEREZA BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Mariela Concepción Meza Grande[1],Minerva Rosas Morales[1], María Reyna Robles López[1], Raúl René Robles de la Torre[1]

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada – Insituto Politécnico Nacional
mmezag2400@alumno.ipn.mx

RESUMEN

El proceso para la obtención del grano de café verde a partir de la cereza de café es denominado "beneficio", por vía húmeda o seca. Objetivamente el beneficio seco, en donde la cereza de café permanece con la pulpa intacta pasando por un secado mecánico o al sol para posteriormente retirar la cascarilla y tostar el grano verde genera los denominados "cafés naturales". Durante la producción de café natural, el proceso inicia con la selección de la cereza madura y la etapa de secado tradicionalmente al sol. El tiempo y temperatura en esta primera etapa de secado al sol del café cereza dependen plenamente de las condiciones climáticas. En consecuencia, el riesgo de contaminación o fermentación no deseada impactan directamente en la calidad del grano y su perfil en taza. El objetivo de este trabajo fue evaluar el tiempo de secado del café cereza bajo condiciones controladas y su efecto en el contenido de azúcares en la pulpa, pergamino y finalmente en la semilla obtenida del café cereza secado bajo condiciones controladas, al inicio y final del proceso de secado. El desarrollo para las condiciones controladas de tiempo y temperatura inicio con la toma de muestras de café cereza madura especie *coffee arabica* de la zona nor-oriental del estado de Puebla del beneficio de café de la cooperativa de productores "Directo al Origen SPR". Para la determinación del tiempo de secado, se registró la perdida de humedad de las muestras de café cereza cada 2h. La temperatura establecida para el proceso de secado fue de 60°C durante todo el proceso en un deshidratador de alimentos "Septree" modelo DBC-18A. Se realizó una curva de humedad para la obtención del porcentaje final de 12-13% en el grano seco. Se determinaron azúcares reductores por el método DNS (MILLER G., 1959). En el periodo de secado se alcanzó un porcentaje de humedad del 61% en café cereza durante las primeras 2h, 53% a las 4h y finalmente un 13% a las 16h. Las concentraciones de azúcares reductores en pulpa y pergamino fueron 18,0 y 16,8 g/l, semilla obtenida del café cereza secado bajo condiciones controladas 4,3 y 2,2 g/l antes y después del secado respectivamente.

INTRODUCCIÓN

El secado es una técnica antigua utilizada para conservar alimentos, pero también una operación clave en procesos industriales modernos. La eficiencia del secado depende de varios factores, siendo la temperatura del aire uno de los más determinantes. Un mayor entendimiento del efecto de la temperatura permite optimizar procesos, reducir costos energéticos y mantener la calidad del producto final (Rodiles&Zamora, 2020)

El proceso de secado de la cereza de café es una etapa crítica en la cadena de producción, ya que influye directamente en la calidad final del grano. Tradicionalmente, el secado se realiza al sol; sin embargo, las condiciones climáticas variables pueden afectar la uniformidad y eficiencia del proceso. Por esta razón, el uso del secado mecánico, que permite controlar parámetros como la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire, ha ganado relevancia en la industria cafetera (Tascón *et al*., 2013).

El secado controlado ofrece ventajas significativas, como la reducción del tiempo de secado y la minimización de riesgos asociados a la fermentación indeseada. No obstante, el uso de temperaturas elevadas durante este proceso puede afectar la composición química del grano. (Cano *et al*.,2018)

Uno de los compuestos más sensibles a estas condiciones son los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa. Estos azúcares desempeñan un papel fundamental en la formación de compuestos aromáticos durante el tueste, afectando directamente el perfil sensorial del café. Según Henao (2016), los tratamientos térmicos intensos durante el secado controlado pueden disminuir la concentración de estos azúcares, comprometiendo la calidad en taza del producto final.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto del secado mecánico bajo condiciones controladas sobre la concentración de azúcares reductores en la cereza de café. Se pretende establecer una correlación entre la temperatura de secado y los cambios químicos que afectan las características sensoriales del grano, con el fin de optimizar los parámetros de secado que garanticen una alta calidad del café.

METODOLOGÍA

Materiales

- Café cereza (*Coffee Arabica*)
- Balanza analítica
- Deshidratador de alimentos “Septree”

Procedimiento Experimental

La elaboración del café natural bajo condiciones controladas comenzó con la recolección de las cerezas hasta llegar a una etapa de tostado, procesos a realizar según se describe en las siguientes secciones.

Materia prima

La primera etapa del trabajo se realizó durante la cosecha de café de diciembre 2024 a marzo 2025 con apoyo de la cooperativa de pequeños productores Directo al Origen SPR de RL en la sierra nororiental del estado de Puebla con microclimas favorables, lluvias todo el año y suelos fértiles que favorecen que la calidad desde su creación tenga las condiciones óptimas. Se realizó la primera recolección de café cereza seleccionando solo cerezas maduras de la variedad arábica.

Traslado de las muestras de café cereza

Las muestras que no se utilizaron de manera inmediata se congelaron y se almacenaron en alícuotas de 3kg a -20 °C hasta el momento del análisis.

Determinación de humedad

Se pesaron 5 g de muestra de cerezas seleccionadas al azar colocadas en un plato de evaporación para determinar su humedad en una termobalanza hasta alcanzar un peso constante.
Los cálculos de contenido de humedad se reportaron en porcentaje de acuerdo a la siguiente formula.

$$\% \text{ Materia Seca} = 100 \times (Pf - Pv)/ Pm$$
$$\% \text{ Humedad} = 100 - \text{Materia Seca}$$

donde Pf es el peso final del plato conteniendo la muestra desecada, Pv el peso del plato vacío y Pm la cantidad de muestra pesada en el ensayo.

Determinación de azúcares reductores

Para la determinación de azúcares en cereza se realizó el método de DNS.
Preparación del reactivo DNS. Para la cuantificación de azucares reductores se aplicó el método DNS de Miller (MILLER, G. (1959). De acuerdo con Burgos (2020) se pesó 1.6 g de NaOH, 43.8 g de tartrato de Na/K y 1 g de ácido 3,5-dinitrosalicílico. Se agregó el NaOH a un vaso de precipitado con 50 ml de agua destilada hasta disolver completamente, se agregó el tartrato de Na/K lentamente

hasta disolver por completo la solución mediante agitación magnética, se agregó el ácido 3,5 dinitrosalicílico, protegiendo el reactivo de la luz con papel aluminio. Finalmente, se aforó la solución hasta 100 mL con agua destilada en un matraz aforado de 100 mL y se dejó en agitación toda la noche.

Preparación de las soluciones patrón de glucosa para la curva de calibración. Se preparó la solución patrón de glucosa con las siguientes concentraciones: 0; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 1,7, y 2,0 g/L. Se añadieron 0,25 mL de cada solución y 0,25 mL del reactivo DNS en tubos de tapa rosca cubiertos con papel aluminio para proteger la reacción de la luz. Los tubos se colocaron en un baño termostático a 92 °C por cinco minutos. Se detuvo la reacción por enfriamiento en hielo por cinco minutos y se agregaron 2,5 ml de agua destilada a cada tubo, se agitó y se realizó la lectura de la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro.

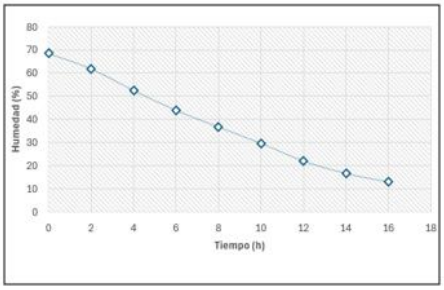
Determinación de la concentración de azúcares reductores en las muestras. Se añadieron 0,25 mL de muestra y 0,25 mL del reactivo DNS en tubos de tapa rosca cubiertos con papel aluminio para proteger la reacción de la luz. Los tubos se colocaron en un baño termostático a 92 °C por cinco minutos. Se detuvo la reacción con enfriamiento en hielo por otros cinco minutos y se agregarán 2,5 ml de agua destilada a cada tubo, se agitaron y se realizó la lectura de la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro. Se realizó una regresión lineal a la curva de calibración, se despejó la variable concentración en función de la absorbancia medida, y se reemplazaron los datos obtenidos.

Secado

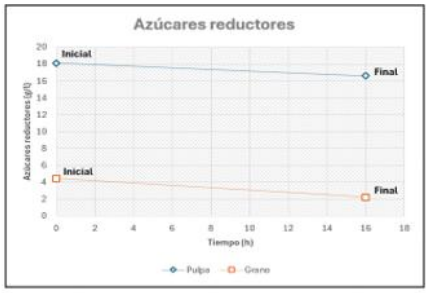
El secado se realizó en un equipo de deshidratado bajo la condición de temperatura de 60°C hasta alcanzar una humedad del 13%. Se tomaron 3kg de muestras de cereza congelada que se sacaron del congelador de -20°C durante 1h a temperatura ambiente para una primera etapa de descongelado. Se pesaron 500g de cereza descongelada para cada una de las charolas de la deshidratadora. Una vez alcanzado el 13% de humedad se determinaron los azúcares reductores de las muestras de cereza seca, grano y pulpa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la gráfica 1 se observa como la estandarización y aumento de temperatura acelera significativamente el secado en comparación con el secado al sol que dura días en lugar de horas, lo cual es ventajoso para la disminución del riesgo de contaminación.



Gráfica 1. Curva de secado relación tiempo-humedad



Gráfica 2. Azúcares reductores de pulpa y grano.

Por otra parte, la gráfica 2 que corresponde a la concentración de azúcares reductores indica una disminución de estos después del secado

CONCLUSIONES

El tiempo de secado del café cereza se vio significativamente reducido con el proceso mecánico en comparación del solar, lo que permite mantener un mayor control del secado y evitar una sobre

fermentación o contaminación durante el proceso. Por otra parte, los azúcares tanto del grano como de la pulpa disminuyeron su concentración.

REFERENCIAS

1. Cano Suárez, H. F., Ciro Velásquez, H. J., & Arango Tobón, J. C. (2018). Efecto del secado y presecado mecánico previo al almacenamiento en la calidad del grano de café (Coffea arabica L.). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 21(2), 439–448. https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1068
2. Henao Arismendy, J. (2016). Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56186
3. Oliveros Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Sanz-Uribe, J. R., Peñuela-Martínez, A. E., & Pabón, J. (2013). Secado solar y secado mecánico del café. En Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura (Vol. 3, pp. 49–80). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_29
4. Rodiles López, J. O., & Zamora Vega, R. (2020). Secado en la industria de alimentos. Tecnoagro.
5. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1996). Secado de granos y secadoras.

EFECTO DE LA LUZ LED (AZUL, ROJA Y AZUL + ROJA) EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO INICIAL DE *Moringa Oleifera Lam*

Paola Susana Alcaraz Tapia[1], Sofía Loza Cornejo[1], Martin Ortiz Morales[2], María de la Luz Miranda Beltrán[1], Paola Trinidad Villalobos Gutiérrez[1], Jesús Castañeda Contreras[1], Celia Guadalupe Pedroza Pedroza[1] y Neidy Ximena Haro Moya[1]

[1]Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, [2]Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

paola.alcaraz.tapia@hotmial.com

RESUMEN

Moringa oleifera, comúnmente conocida como el “árbol de la vida”, es un árbol multiusos ya que se le atribuyen principalmente propiedades medicinales, nutricionales, así como ambientales (acción fitorremediadora). Por ejemplo, las semillas son ricas en aceite, el cual es utilizado tanto de manera comestible, así como biocombustible y en el tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, las luces LED de diferentes longitudes de onda han tomado gran importancia debido a que su uso en el crecimiento de plantas genera en estas una mayor acumulación de nutrientes o compuestos químicos como metabolitos primarios o secundarios; además, ayuda en algunas especies de plantas a incrementar el porcentaje de germinación de las semillas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el porcentaje de germinación (PG), el índice de velocidad de germinación (IVG), así como la morfología de las plántulas de moringa (longitud de la raíz y altura de la parte aérea) bajo diferentes tratamientos con luces LED. Para la germinación de las semillas estas se distribuyeron (n= 5 semillas por tres repeticiones en cada tratamiento) en cámaras con luces LED de diferente longitud de onda: azul (A), roja (R), una combinación de azul+roja (A+R) y el grupo control (C). Se registró el número de las semillas germinadas cada tercer día y se calculó tanto el PG como el IVG durante 18 días. Posteriormente, una vez germinadas las semillas se evaluó la morfología de las plántulas (longitud de raíz y altura de la parte aérea) con un vernier digital. En el PG los tratamientos de LED A y R, junto con el control (C), presentaron un valor similar (53.33±1.3%), mientras que para el IVG no destacó ningún tratamiento. En cuanto al desarrollo morfológico, el tratamiento con LED R promovió una mayor altura de la parte aérea (22.35±7.79 mm) y el tratamiento con LED A presentó una mayor longitud de raíz (22.25±9.12 mm).

INTRODUCCIÓN

Las plantas reciben radiación solar y captan principalmente la luz dentro del intervalo del espectro electromagnético que abarca desde los 400 a 700 nm llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR), la cual es captada principalmente por la clorofila sobre todo en las regiones rojo y azul del espectro electromagnético. Esta utiliza la energía de la luz solar para transformar el agua y el dióxido de carbono (CO_2) en oxígeno y moléculas orgánicas complejas como el almidón. Este proceso se conoce como fotosíntesis (Blankenship, 2014; Bures y col., 2018). Además de la clorofila existen otros fotorreceptores que ayudan a captar longitudes de onda específica como los fitocromos, criptocromos y fototropinas. Estos fotorreceptores, les permiten a las plantas monitorear su entorno a través de la detección de longitudes de onda específicas. Por ejemplo, la familia de fotorreceptores llamadas “fitocromos” detecta la radiación en el rango rojo/rojo lejano (660-730 nm). Los fotorreceptores de la familia de los criptocromos y fototropinas son capaces de detectar la radiación en el rango UV-A/ azul (315-490nm) (Sullivan y Deng, 2003; Pinto y Lizana, 2004; Fantini y col., 2019).

Actualmente, la iluminación artificial es muy utilizada debido a que mejora las características de algunos cultivos. Se utilizan principalmente las luces LEDs debido a su larga vida útil, se puede controlar de mejor manera el espectro, además, diversos estudios han demostrado que el uso de LEDs aumenta la tasa de multiplicación de explantes y permite obtener mayor longitud y número de brotes *in vitro*, gracias a la mejora en la calidad de la luz (Rocha y col., 2017).

Moringa oleifera Lam. es una especie de la familia Moringaceae la cual se distingue de otras familias de plantas por una combinación única de rasgos. Sus especies se caracterizan por ser árboles con hojas pinnadas grandes. Los frutos forman una cápsula larga y leñosa que cuando alcanza la madurez se abre lentamente en tres valvas que se separan la una de la otra por su longitud, quedando pegadas sólo en la base del fruto. En la mayoría de las especies, las semillas presentan tres alas longitudinales. La combinación de hojas pinnadas, frutos trivalvados y semillas con tres alas (Figura 1), hace que sea relativamente sencillo reconocer una planta de moringa; además es la única planta en México con esas características (Olson y Fahey, 2011).

Moringa oleifera tiene también otras características distintivas, es una planta resistente a la sequía y aunque es originaria de la India, se ha cultivado en diversas regiones tropicales y subtropicales de América Central, el norte y el sur de Filipinas, Camboya, las islas del Caribe y África (Saa y col., 2019). Prácticamente a toda la planta (hojas, tallo, raíz, semilla) se le atribuyen diferentes propiedades medicinales como analgésicas, antihipertensivas, antioxidantes, antiinflamatorias, diuréticas, hepatoprotectoras, antimicrobianas, antivirales, neuroprotectoras, anticancerígenas, entre otras (Abd-Rani y col., 2018; Padayachee y Baijnath, 2020; Singh y col., 2020). En especial la semilla se utiliza por su gran calidad de aceite, ya que contiene alrededor de un 70% de ácido oleico, el cual es resistente a la oxidación y es ideal para utilizarlo en mezclas con otros aceites para retrasar la oxidación (Velázquez y col., 2015; Paniagua y Chora, 2016). Además, la torta de semillas, resultante de la extracción del aceite, se puede utilizar como fertilizante o para tratar la purificación del agua (Lea, 2010).

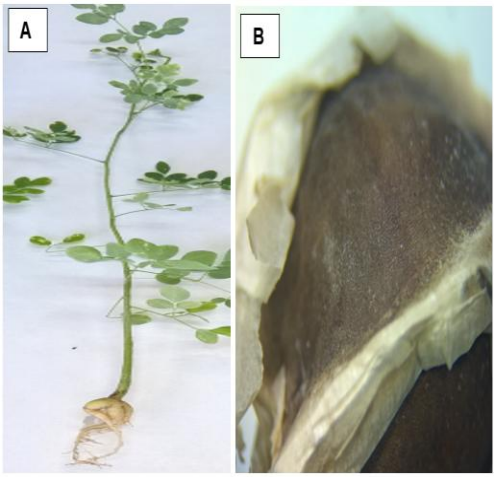


Figura 1. *Moringa oleifera*. **A.** Plántula, **B.** Semilla. Imágenes propias

TEORÍA

Las luces LEDs son fuentes de luz monocromática y tienen una longitud de onda de emisión específica, la cual está determinada por los elementos que componen su chip. Existen luces LEDs para todas las longitudes de onda del rango visible, se puede obtener una amplia variedad de espectros de luz a partir de luminarias LEDs integrando simplemente LEDs específicos para las longitudes de onda deseadas. Gracias a esto, las luces LEDs también han comenzado a utilizarse en la producción vegetal debido a diversas ventajas que poseen, tales como la flexibilidad para controlar las condiciones de iluminación, incluyendo la longitud de onda, la porción irradiada, así como la temporización obteniendo mejoras de su aplicación en las plantas (Gupta y Agarwal, 2017).

Como se mencionó anteriormente, además de la clorofila, las plantas poseen diversos fotorreceptores que les permiten captar longitudes de onda específicas. Estos se clasifican en criptocromos, fitocromos y fototropinas, cada uno de los cuales desencadena efectos distintos en el desarrollo y comportamiento vegetal, como se describe a continuación (Bures y col., 2018):

- Las fototropinas inciden en la ubicación de los cloroplastos y en la apertura estomática. Absorben luz azul.
- Los criptocromos están relacionados con las respuestas morfogenéticas, como la inhibición del alargamiento de los tallos, la expansión de los cotiledones, la producción de antocianos y la floración. Absorben fotones de las longitudes de onda de UV (ultravioleta), azul y verde.
- Los fitocromos se encargan principalmente de hacer florecer a las plantas. Afectan a la elongación de los tallos, la expansión de las hojas y perciben los cambios entre las proporciones de luz roja y roja lejana.

PARTE EXPERIMENTAL

Las semillas se obtuvieron de manera comercial. Posteriormente se observaron bajo un estereomicroscopio y se descartaron aquellas con daños visibles en la testa. Se seleccionaron 15 semillas para cada tratamiento con luces LED (Azul, Roja y una mezcla de Azul + Roja) y el control (invernadero). Las semillas seleccionadas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 10% durante 15 minutos, se enjuagaron con agua destilada y se dejaron en imbibición en agua destilada durante 24 horas como acondicionamiento osmótico para la germinación (Padilla y col., 2012).
Posteriormente, las semillas se colocaron sobre papel filtro en cajas de Petri, se agregó agua destilada y se sellaron las cajas con parafilm. Después las semillas se coloraron en cámaras con luces LEDs Azul, Roja, Azul + Roja y el control (invernadero) durante aproximadamente 18 días. En este lapso se contaron cada tercer día las cajas de Petri para observar el avance en el proceso de germinación. Con los datos recolectados se calculó el porcentaje de germinación (PG), y el índice de velocidad de germinación (*IVG*) (Valdillo y col., 2004), donde:

$$IVG = ni/ti$$

Donde:
***ni*:** Número de semillas germinadas en el i-ésimo día
***ti*:** Tiempo en días, para la germinación en el i-ésimo día

una vez registrado los datos de germinación, a los 18 días se obtuvieron las plántulas de *Moringa oleifera* y se les midieron algunos parámetros morfológicos como altura de la parte aérea y longitud de la raíz.

RESULTADOS

Como se observa en la Figura 2 se obtuvo un mayor PG al sexto día; sin embargo, no destacó ningún tratamiento en comparación con el Control, ya que prácticamente las semillas provenientes de los tratamientos bajo luces LEDs Roja y Azul presentaron el mismo PG que el Control. Las semillas provenientes de la combinación de luces LEDs Azul + Roja presentaron el menor porcentaje en el sexto día.

En cuanto al IVG al tercer día no destacó ningún tratamiento ya que el Control obtuvo el valor promedio mayor; no obstante, al sexto día destacaron las semillas de moringa provenientes del tratamiento bajo luz LED Roja presentando un mayor IVG al sexto día comparado con el Control y los demás tratamientos. Al comparar los resultados obtenidos con otros autores, Paniagua y col. (2015) también obtuvieron un mayor IVG en semillas de brócoli (*Brassica oleracea* L.) provenientes del tratamiento bajo luces LEDs rojas. De acuerdo con Jha y col. (2010), la luz roja promueve la germinación de las semillas. El fitocromo B es activado por luz roja, por lo que la germinación de semillas es promovida por la activación transcripcional epigenética de las enzimas biosintéticas del ácido giberélico (Cho y col., 2012).

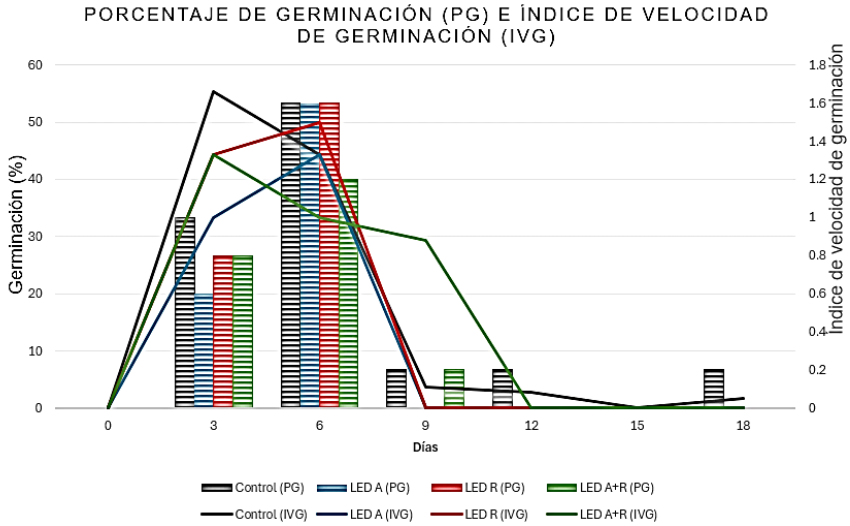


Figura 2. Comparación del PG e IVG de los tratamientos de luces LED Azul, Roja, Azul + Roja vs el Control. Los datos representan la media (n=3 repeticiones).

En cuanto a las variables morfológicas destacaron las plántulas provenientes de la luz LED roja al presentar mayor altura aérea y las plántulas provenientes de la luz LED azul destacaron por presentar una mayor longitud de la raíz (Cuadro 1). Moreno y col. (2017) también observaron una mayor longitud del tallo en plántulas de chile serrano (*Capsicum annuum* L.) crecidas bajo LEDs rojos. Esto se debe a que la luz roja (mediada por fitocromos) influye en incrementar la altura de las plantas, en cambio la luz azul (mediada por criptocromos y fototropinas) provoca plantas más compactas y un tallo más corto (Berkovich y col., 2017).

Cuadro 1. Comparación de parámetros morfológicos de plántulas de *Moringa oleifera* provenientes de diferentes tratamientos con luces LEDs *vs*. Control.

	Tratamiento			
Variable morfológica	**Control**	**LED Azul**	**LED Roja**	**LED Azul+Roja**
Altura aérea	18.32±4.27	10.23±4.16	22.35±7.79	12.46±3.19
Longitud de raíz	16.7±4.02	22.25±9.12	8.25±1.79	6.37±1.2

Los datos representan la media ± el error estándar (n=15)

CONCLUSIONES

En conclusión, los tratamientos con luces LEDs no muestran un aumento significativo en la germinación de las semillas de moringa. Sin embargo, en el desarrollo morfológico, se observa que la luz LED roja estimula el crecimiento de la parte aérea de las plantas, mientras que la luz LED azul favorece el desarrollo radical.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abd Rani, N.Z.; Husain, K.; Kumolosasi, E. (2018). *Moringa* Genus: A Review of Phytochemistry and Pharmacology. Front. Pharmacol. Vol 9; 108.
2. Dutta Gupta, S., and Agarwal, S. (2017). Light emitting diodes for agriculture: Smart lighting. Springer. 1-334.

3. Berkovich, B.A., Konovalova, I.O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A.N., Avercheva, O.V., Bassarskaya, E.M., Kochetova, G.V., Zhigalova, T.V., Yakovleva, O.S., Tarakanov, I.G. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. REACH. Vol. 6; 11-24.
4. Blankenship, R.E. (2014). Molecular mechanisms of photosynthesis. 2nd ed. Wiley Blackwell. New Delhi, India.
5. Bures, S., Urrestarazu, M., y Kotiranta, S. (2018). Iluminación artificial en agricultura. Artículo técnico. http://www.bibliotecahorticultura.com/. Accesado: 14/05/2025.
6. Cho, J.N., Ryu, J.Y., Jeong, Y.M.I., Park, J., Song, J.J., Amasino, M.R. (2012). Control of seed germination by light-induced histone arginine demethylation activity. Developmental Cell. Vol. 22; 736-748.
7. Fantini, E.; Sulli, M.; Aprea, G.; Jiménez-Gómez, J.; Bendahmane, A.; Perrotta, G.; Giuliano, G. and Facella, P. (2019). Pivotal roles of cryptochromes 1a and 2 in tomato development and physiology. Plant Physiol. 179(2):732-748. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.18.00793
8. Jha, P., Norsworthy, J.K., Riley, M.B., and Bridges, W.Jr. (2010). "Annual Changes in Temperature and Light Requirements for Germination of Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) Seeds Retrieved from Soil". Weed Science, 58; 426-432.
9. Lea, M. (2010). Bioremediation of Turbid Surface Water Using Seed Extract from *Moringa oleifera* Lam. (Drumstick) Tree. Curr. Protoc. Microbiol. Vol. 16; 1-14. DOI: 10.1002/9780471729259.mc01g02s16
10. Moreno, J. A., Loza, C. S., y Ortiz, M. M. (2017). Efecto de luz LED sobre semillas de *Capsicum annuum* L. var. serrano. Biotecnología Vegetal. Vol. 17 (3), 145 – 151.
11. Singh, A.K.; Rana, H.K.; Tshabalala, T.; Kumar, R.; Gupta, A.; Ndhlala, A.R.; Pandey, A.K. (2020). Phytochemical, Nutraceutical and Pharmacological Attributes of a Functional Crop Moringa oleifera Lam: An Overview. S. Afr. J. Bot. Vol. 129, 209–220.
12. Sullivan, J. A., and Deng, X. W. (2003). From seed to seed: The role of photoreceptors in *Arabidopsis* development. Dev. Biol. Vol. 260, 289-297.
13. Olson, M. E., y Fahey, J. W. (2011). *Moringa oleifera*: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. Revista Mexicana de Biodiversidad. Vol. 82, 1071-1082.
14. Padayachee, B.; Baijnath, H. (2020). An Updated Comprehensive Review of the Medicinal, Phytochemical and Pharmacological Properties of *Moringa oleifera*. S. Afr. J. Bot. vol.129, 304–316.
15. Paniagua, A., y Chora, J. (2016). Elaboración de Aceite de semillas de *Moringa oleifera* para diferentes usos. Revista de Ciencias de la Salud. Vol. 3(9), 36-46.
16. Paniagua, P. G., Hernández, A. C., Rico, M. F., Domínguez, P. F., Martínez, O. E., y Martínez, G. C. (2015). Efecto de la luz LED de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). Polibotánica. No. 40,199-212.
17. Pinto, M., y Lizana, C. (2004). Respuestas y mecanismos de protección en plantas a la radiación ultravioleta - B. In Fisiología Ecológica en Plantas, H. M. Cabrera (ed). Ediciones Universitarias de Valparaiso, Valparaíso, pág. 43-58.
18. Rocha, P.S., Pedroso de Oliveira, R., Bueno-Scivittar, W., y Mosele, R.H. (2017). Uso de LEDs na multiplicação in vitro de três cultivares de bananeira. Revista Colombiana de Ciências Hortícolas. Vol. 11(2); p. 247-252. https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.6666.
19. Velázquez, Z. M., Peón, E. I., Zepeda, B. R., y Jiménez, A. M. (2015). Moringa (*Moringa oleifera* Lam.): usos potenciales en la agricultura, industria y medicina. Vol. 22, 95-116.
20. Valdillo, G., Suni, M., y Cano, A. (2004). Viabilidad y germinación de *Puya raimondii* Harms (Bromeliaceae). Rev. Peru. Biol. Vol. 11(1), 71-78.

FASES DE SELECCIÓN Y RENDIMIENTO EN CAMPO DE NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* Spp)

Jazmin Lavin-Castañeda[1,3], Fernando Carlos Gómez-Merino[2], Libia Iris Trejo-Téllez[2], Arturo Pérez-Vázquez[1], Gustavo López-Romero[1], José López-Collado[1]

[1]Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, México; [2]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México; [3]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Chetumal, Quintana Roo, México.

lavin.jazmin@colpos.mx

RESUMEN

La selección de variedades en programas de mejoramiento genético busca identificar genotipos superiores para maximizar el rendimiento y la resistencia a plagas o enfermedades. Sin embargo, un proceso continuo de selección puede llevar a la degradación del material genético, especialmente cuando se reducen las variaciones dentro de las poblaciones. Esta reducción genética puede afectar negativamente la adaptación a nuevos desafíos ambientales, limitando la evolución y la estabilidad de las variedades. Por lo tanto, es crucial balancear la selección con prácticas que mantengan la diversidad genética. En este contexto se evaluaron 11 nuevas variedades de caña de azúcar en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, en tres fases del programa de selección [Fase Adaptabilidad (Resoca cinco), Fase Semicomercial (Soca) y Fase Semillero (Plantilla)]; y cuatro variedades comerciales (maduración temprana, media y tardía), con 13 meses de edad, con el objetivo de determinar la estabilidad productiva conforme avanza el proceso de selección de nuevas variedades. Se realizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones para rendimiento en campo. Los datos se analizaron en Minitab Versión 21. Se encontró que la producción obtenida en cuanto a rendimientos en campo en la Fase Adaptabilidad, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-321 y Mex 09-341 fueron las variedades que presentaron rendimientos en campo desde 204.86 a 243.42 t ha^{-1}, superando a las variedades comerciales, que oscilaron desde 114.19 a 197.72 t ha^{-1}. En la Fase Semicomercial destacaron en este orden, las variedades Mex 09-341, Mex 09-289, Mex 09-321 y Mex 09-290 presentaron rendimientos de 249.53, 170.04, 157.77 y 147.48 t ha^{-1}, respectivamente, superando a las variedades comerciales que oscilaron en esta fase desde 115.86 a 145.83 t ha^{-1}. Es de notar que, en esta fase, al menos seis variedades presentaron rendimientos más bajos que en las fases anteriores, lo cual puede ser debido a la mayor frecuencia de precipitaciones pluviales y falta de aplicaciones de fertilizantes. En la Fase Semillero, solo la variedad Mex 09-290 presentó mayor rendimiento (113 a 177 t ha^{-1}).

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, no solo por su uso como principal fuente de azúcar, sino también por su papel creciente en la producción de bioenergía y etanol (Moreira *et al*., 2019). A pesar de los grandes avances, la producción promedio nacional de Brasil, aún está muy por debajo del rendimiento teórico ya que el cultivo tiene un potencial de alcanzar hasta las 380 t ha^{-1} (Waclawovsky *et al*., 2010). En países como México, la producción de caña de azúcar representa una actividad económica esencial, donde las condiciones agroecológicas permiten una producción competitiva. Sin embargo, para incrementar el rendimiento del cultivo, es indispensable el desarrollo continuo de nuevas variedades que se adapten a los desafíos agronómicos, fitosanitarios y climáticos actuales. El mejoramiento genético es una herramienta esencial para la innovación en el cultivo de caña de azúcar, proceso orientado a generar variedades con mayor potencial productivo, resistencia a enfermedades, así como mejor adaptación a condiciones adversas como sequía o suelos marginales (Kumar *et al*., 2024). Para lograr esto, los programas de mejoramiento se desarrollan en distintas fases de evaluación, que permiten seleccionar de manera progresiva los genotipos más prometedores. Las fases de selección genética en la caña de azúcar suelen incluir la Fase de Adaptabilidad, donde se identifican materiales

genéticos con buen desempeño inicial bajo condiciones locales; la Fase Semicomercial, que simula el manejo agronómico convencional con mayor control y precisión; y la Fase Semillero, en la que las variedades son evaluadas en parcelas de mayor escala antes de su liberación definitiva (Mahadevaiah *et al*., 2021). Cada una de estas fases cumple una función clave en la selección del material genético y la verificación de su estabilidad productiva. Una de las principales preocupaciones en estos procesos es la pérdida de variabilidad genética. La selección continua de genotipos superiores, si no se realiza cuidadosamente, puede reducir la diversidad genética de las poblaciones, afectando su capacidad de adaptación futura (Perera *et al*., 2023). Esta erosión genética puede limitar la respuesta del cultivo ante cambios ambientales o nuevas amenazas sanitarias, poniendo en riesgo la sostenibilidad del sistema agrícola (Cursi *et al*., 2022). Aspectos genéticos, condiciones ambientales y prácticas de manejo agronómico, influyen significativamente entre las fases de selección, se ha demostrado que la edad de cosecha tiene un impacto directo en la concentración de sacarosa y en la biomasa acumulada, lo cual incide directamente en el rendimiento económico por hectárea (Urgesa & Keyata, 2021). En el presente estudio, desarrollado en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, se evaluó el comportamiento productivo de 11 nuevas variedades de caña de azúcar en tres fases del programa de mejoramiento: Adaptabilidad (Resoca cinco), Semicomercial (Soca) y Semillero (Plantilla). Junto con estas variedades experimentales, se evaluaron cuatro variedades comerciales sembradas en México, representando distintos ciclos de maduración: temprano, medio y tardío. El objetivo principal fue determinar la estabilidad productiva de las nuevas selecciones conforme avanzan las fases de evaluación, identificando aquellas que mantuvieran altos niveles de rendimiento bajo diferentes condiciones y prácticas de manejo.

TEORÍA

Existen a la fecha, desafíos en el mejoramiento genético de caña de azúcar por ser altamente poliploide, lo que complica la identificación de genes específicos y la interpretación de los efectos genéticos, complejidad del genoma de la caña de azúcar requiere el desarrollo de herramientas bioinformáticas avanzadas y modelos estadísticos especializados para analizar los datos genómicos de manera efectiva (Liang, 2024). La expresión fenotípica de los caracteres en caña de azúcar puede variar considerablemente debido a factores ambientales, lo que dificulta la evaluación precisa de los genotipos. La plasticidad fenotípica y las tendencias genéticas han influido en la mejora genética de la caña de azúcar en Luisiana, destacando la importancia de considerar las interacciones genotipo-ambiente (G × A) en los programas de mejoramiento (Baptistella *et al*., 2024). El futuro del mejoramiento genético de la caña de azúcar se orienta hacia la integración de tecnologías avanzadas, como la selección genómica (SG), la edición genética y la selección asistida por marcadores (MAS), en programas de mejoramiento más eficientes y precisos; sugirieron que la combinación de estas tecnologías con enfoques tradicionales podría acelerar significativamente el desarrollo de nuevas variedades con características mejoradas. Además de la colaboración internacional y el intercambio de información y recursos que serán esenciales para superar los desafíos técnicos y económicos asociados con el mejoramiento genético de la caña de azúcar. La importancia de la cooperación global para compartir conocimientos, tecnologías y germoplasma, lo que permitirá avanzar en la mejora del cultivo de manera más efectiva (Liang, 2024). Los programas de mejoramiento genético de caña de azúcar han avanzado significativamente en las últimas décadas, impulsados por los avances en biotecnología y genómica. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la complejidad genómica, la variabilidad fenotípica y la infraestructura técnica. Aún existen desafíos que requieren, de la integración multidisciplinaria para el fortalecimiento de desarrollar variedades más productivas, resistentes y adaptadas a las condiciones cambiantes del entorno, asegurando la sostenibilidad y competitividad del cultivo en el futuro.

PARTE EXPERIMENTAL

La presente investigación se llevó a cabo en los campos experimental del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, localizado en la Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz a 18° 86" latitud norte y 96° 85 longitud oeste, a una altitud de 650 m. Se evaluaron 11 nuevas variedades de caña de azúcar en tres fases del programa de selección (Fase Adaptabilidad (Resoca cinco), Fase Semicomercial (Soca) y Fase Semillero (Plantilla); así como cuatro variedades comerciales (maduración temprana, media y tardía).

Las 11 nuevas variedades evaluados son: Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341; mientras que las variedades testigo fueron: CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431 y Mex 05-204.

Todas las mediciones se hicieron a los 13 meses después de la siembra (MDS), y 13 meses después del corte (MDS); se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones por fase se selección para determinar el rendimiento en campo en t ha^{-1}. Los datos se analizaron por fases de selección con un análisis de varianza y pruebas de comparación de Tukey ($p \leq 0.05$) usando el software Minitab Versión 21.

RESULTADOS

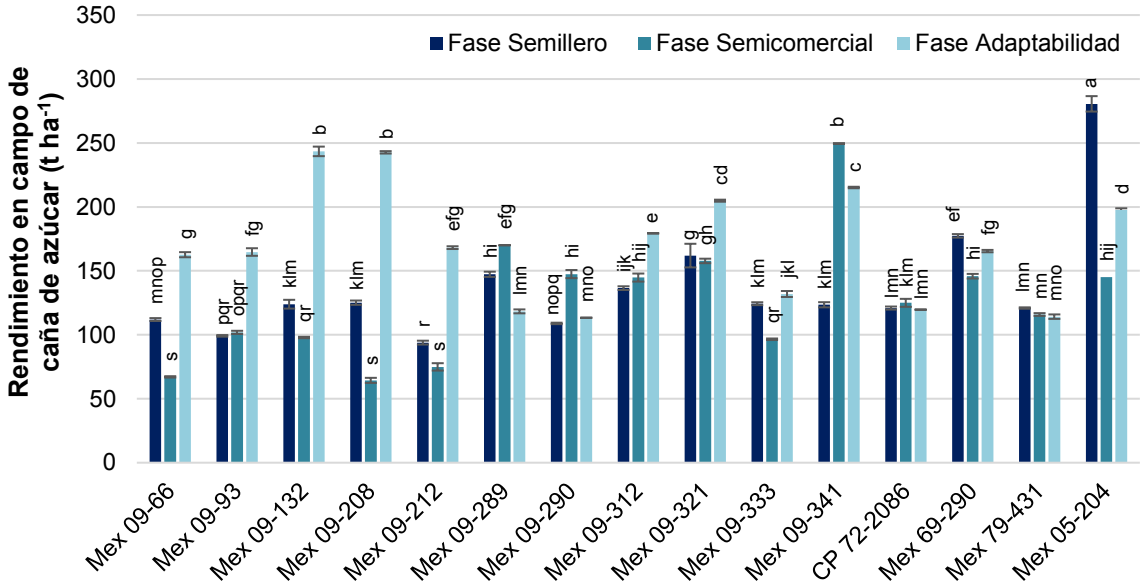
En el presente estudio se evaluó el rendimiento en campo de 11 nuevas variedades de caña de azúcar, durante tres fases de selección: Adaptabilidad, Semicomercial y Semillero. Los resultados obtenidos demostraron un comportamiento sobresaliente en las tres Fases de selección por parte de algunas de las nuevas variedades en comparación con los testigos comerciales comúnmente utilizados.

Durante la Fase de Adaptabilidad, se identificaron cuatro variedades con rendimientos superiores: Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-321 y Mex 09-341, con valores que oscilaron entre 204.86 y 243.42 t ha^{-1}. Estos rendimientos superaron a los testigos, los cuales se situaron entre 114.19 y 197.72 t ha^{-1}, lo que evidencia una alta capacidad de adaptación y productividad bajo las condiciones evaluadas (**Figura 1**).

En la Fase Semicomercial, las variedades Mex 09-341, Mex 09-289, Mex 09-321 y Mex 09-290 destacaron con rendimientos de 249.53, 170.04, 157.77 y 147.48 t ha^{-1}, respectivamente. Estas variedades superaron de manera significativa a los testigos, cuyos rendimientos fluctuaron entre 115.86 a 145.83 t ha^{-1}, este comportamiento sugiere una estabilidad en el rendimiento cuando las variedades son evaluadas en condiciones más cercanas al entorno comercial real (**Figura 1**).

Finalmente, en la última fase de selección, Fase de Semillero, la variedad Mex 05-204 presentó el mayor rendimiento en campo de manera general logrando 280.59 t ha^{-1}, consolidándose como una opción altamente productiva. Además, cuatro de las once variedades evaluadas en esta etapa registraron rendimientos entre 123.49 a 161.93 t ha^{-1}, superando a dos variedades comerciales (CP 72-2086 y Mex 79-431) que se siguen sembrando a nivel nacional, con rendimientos de 120.92 y 120.93 t ha^{-1}, respectivamente (**Figura 1**).

Esto indica que al menos cuatro variedades pueden estar contribuyendo al sector agroindustrial para que resulte más competitiva la producción, ya que esos materiales genéticos han demostrado presentar rendimientos superiores que los testigos que mayormente se siembran en el país; a excepción de la variedad Mex 69-290 que alcanzó rendimientos en campo de 177.37 t ha^{-1}; superando significativamente a las dos fases de selección previas a la Fase Semillero; es decir que a pesar de los años en que fue seleccionada, su comportamiento al renovar la semilla en campo, mantiene sus características de producción en campo estables.



Variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en tres Fases de Selección del programa de mejoramiento genético a los 13 MDS y 13 MDC.

Figura 1. Rendimiento en campo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), en tres Fases de selección de mejoramiento genético; Fase Semillero (Plantilla), Fase Semicomercial (soca) y Fase Adaptabilidad (resoca cinco); a los 13 meses después de la siembra (MDS) y 13 meses después del corte (MDC) de nuevas variedades y de variedades comerciales. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Es importante resaltar que, a partir del cierre del Instituto Mexicano para la Producción Azucarera (IMPA) a inicio de la década de 1990, el Programa Nacional de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar sufrió un estancamiento, lo que originó baja generación de nuevas variedades y con ello una restringida base genética de las variedades que actualmente sostienen la producción de azúcar del país (Lavín-Castañeda *et al*., 2020). Por lo tanto, la reactivación de este tipo de programas para la generación de nuevas variedades de caña de azúcar es una condición *sine qua non* para lograr la sostenibilidad del campo cañero en México.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se concluye que las variedades Mex 09-321 y Mex 09-93 presentan una producción en campo estable durante las dos últimas fases del proceso de selección (Fase Semicomercial y Fase Semillero), ya que no se observaron diferencias significativas en su rendimiento conforme avanzó la evaluación. Asimismo, es importante destacar que las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431, utilizadas como testigos en cada una de las fases, mostraron un comportamiento altamente estable en cuanto a rendimiento en campo, sin variaciones significativas entre fases. Estos resultados sugieren que tanto las nuevas variedades seleccionadas, como los testigos presentan consistencia en su desempeño productivo bajo las condiciones evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Moreira, L. A. Cardoso-Moraes, G. Silva de Aquino, R. Heinrich, “Biofuel production from sugarcane: various routes of harvesting energy from the crop”, in *Sugarcane Biofuels* (Springer Nature, Cham, 2019), Chapter 2, pp. 21-35.

2. A. J. Waclawovsky, P. M. Sato, C. G. Lembke, P. H. Moore, G. H. Souza, “Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content”, Plant Biotechnol. J., Vol. 8, 3, 2010, pp. 263-276.
3. C. Mahadevaiah, C. Appunu, K. Aitken, G. S. Suresha, P. Vignesh, H. K. M. Swamy, R. Valarmathi, G. Hemaprabha, G. Alagarasan. B. Ram, “Genomic selection in sugarcane: current status and future prospects”, Front. Plant Sci., Vol. 12, 2021, 708233.
4. D. E, Cursi, R. O. Castillo, Y. Tarumoto, M. Umeda, A. Tippayawat, W. Ponragdee, J. Racedo, M. F. Perera, H. P. Hoffmann, M. Sampaio-Carneiro, “Origin, genetic diversity, conservation, and traditional and molecular breeding approaches in sugarcane”, in *Cash Crops* (Springer Nature, Switzerland, 2022), Chapter 3, pp 83-116.
5. G. D. Urgesa, E. O. Keyata, “Effect of harvesting ages on yield and yield components of sugarcane varieties cultivated at Finchaa sugar factory, Oromia, Ethiopia”, Int. J. Food Sci., Vol. 2021, 2, 2021, pp. 1-6.
6. J. L. C. Baptistella, B. A. Blanchard, Z. Taylor, C. A. Kimbeng, R. Fritsche-Neto, K. A. Gravois, A. F. B. Reis, “Phenotypic plasticity and genetic trends in the past 30 years of sugarcane genetic improvement in Louisiana”, Crop Sci., Vol. 64, 1, 2023, pp. 44-54.
7. J. Lavin-Castañeda, H. E. Sentíes-Herrera, L. I. Trejo-Téllez, J. V. Hidalgo-Contreras & F. C. Gómez-Merino, “Advances in the selection program of sugarcane (*Saccharum* spp.) varieties in the Colegio de Postgraduados”, AgroProductividad, Vol. 13, 11, 2020, pp. 123-129.
8. K. W. Liang, “Implementing genomic selection in sugarcane breeding programs: challenges and opportunities”, Plant Gene Trait., Vol. 15, 1, 2024, pp. 23-32.
9. M. F. Perera, F. Budeguer, R. Enrique, S. Ostengo, A. S. Noguera, J. Racedo, “Potential and advanced strategies for sugarcane improvement,” in *Omics Approaches for Sugarcane Crop Improvement* (Gaur, Rajarshi Kumar, Boca Raton, FL, 2023) Chapter 1, pp. 1-32.
10. T. Kumar, J.-G. Wang, C.-H. Xu, X. Lu, J. Mao, X.-Q. Lin, X.-Q. Lin, C.-Y. Kong, C.-J. Li, X.-J Li, C.-Y. Tian, M. H. M. Ebid, X.-L. Liu, H.-B. Liu, “Genetic engineering for enhancing sugarcane tolerance to biotic and abiotic stresses”, Plants, Vol. 13, 13, 2024, 1739.

IMPACTO DEL TIEMPO DE GERMINACIÓN DE LA LENTEJA VERDE (*Lens Culinaris* M.) SOBRE COMPUESTOS ANTINUTRICIONALES

Ana Karen Manríquez Álvarez, Yuliza Guadalupe Morales Herrejón, Jennifer Reyes Tapia, Consuelo de Jesús Cortés Penagos, José Herrera Camacho y Berenice Yahuaca Juárez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
berenice.yahuaca@umich.mx.

RESUMEN

La lenteja verde (*Lens culinaris* M.) es una legumbre reconocida por su valor nutricional, especialmente por su contenido en proteínas y fibra. Sin embargo, la presencia de compuestos antinutricionales, como los inhibidores de tripsina (IT), limita la absorción de proteínas y está asociada a efectos adversos como la distención abdominal y flatulencias, disminuyendo su aceptación en la dieta diaria. La tripsina es una enzima importante en la digestión de las proteínas, es inhibida por estos compuestos anti-nutricios comprometiendo la biodisponibilidad de aminoácidos esenciales. La germinación puede disminuir estos compuestos, mejorando el perfil nutricional de las semillas. Por ello, es importante determinar cómo el tiempo de germinación afecta la actividad de esta enzima en la lenteja verde. Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes periodos de germinación sobre el contenido de anti-nutricios como los IT. Las semillas de lenteja verde (Lens culinaris M) se imbibieron por 24h/25°C, posteriormente se colocaron en una cámara ambiental para su germinación a 27°C/ 0, 2, 4, 6 y 8 días, se deshidrataron (70°C/24hr) y se molieron. La determinación de los IT se realizó mediante método por colorimetría reportado por Kakade (1984). El mayor porcentaje de inhibición de la tripsina se observa en la lenteja cruda (0.20%), cuando comienza la germinación, a los dos días (0.10%) y cuatro días (0.09%) la inhibición disminuye significativamente en un 50 %. Posteriormente, a los seis y ocho días vuelve a incrementar, sin diferencia significativa con el control. La germinación de la lenteja verde reduce significativamente los inhibidores de tripsina alcanzando su punto más bajo a los cuatro días y posteriormente incrementa, por lo que el tiempo óptimo de germinación se sitúa en la primera etapa del proceso, siendo importante para asegurar la absorción de proteínas y mejorar su valor nutricional.

INTRODUCCIÓN

En México, para el cultivo de lenteja (*Lens culinaris* M.) se ha destinado un aproximado de 8,550 hectáreas, concentrándose la producción principalmente en el estado de Michoacán, la cual aporta alrededor del 90 % del volumen producido a nivel nacional, seguido por Guanajuato, que contribuye con el 10 % restante (Sáenz-Reyes et al., 2022). Esta distribución resalta la relevancia económica y social de la lenteja en ciertas regiones del país, donde no solo representa una fuente de ingreso agrícola, sino también un componente esencial para la seguridad alimentaria local.

La lenteja es una legumbre de importancia nutricional, ampliamente valorada por su elevado contenido proteico, el cual alcanza aproximadamente un 25 % de su composición, nivel comparable al de otras legumbres como la soya (Giannakoula et al., 2012). Además de su contenido en proteínas, la lenteja aporta cantidades significativas de fibra dietética, minerales como hierro, zinc y magnesio, y compuestos fenólicos, los cuales, entre algunos otros compuestos bioactivos tienen una alta capacidad antioxidante, contribuyendo así de manera significativa a la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles como la diabetes tipo 2, enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Desde el punto de vista de su perfil de carbohidratos, la lenteja se distingue por contener almidón de lenta digestibilidad y fracciones de fibra no digerible, lo que favorece a un bajo índice glucémico en los consumidores (Anuradha et al., 2017). Esta característica metabólica permite un control más eficiente de la glucemia posprandial y prolonga la sensación de saciedad, factores que resultan de alto valor en la prevención y manejo del sobrepeso, obesidad y síndrome metabólico. Debido a su composición, la lenteja es considerada un alimento funcional, importante en programas de alimentación saludables.

Sin embargo, a pesar de ser una fuente rica en nutrientes como los mencionados anteriormente, el consumo de lentejas también implica la ingesta de compuestos antinutricionales, estos compuestos pueden dificultar su absorción y aprovechamiento en el organismo. Los antinutricios, aunque forman parte natural del metabolismo secundario de las plantas, ejercen efectos negativos sobre la biodisponibilidad de nutrientes esenciales. Por ejemplo, los fitatos presentes en la lenteja tienen una alta afinidad por minerales como el hierro, el zinc y el calcio, formando complejos insolubles que impiden su adecuada absorción intestinal (Hurrell, 2003; Petry et al., 2016). Esta interacción puede contribuir al desarrollo de deficiencias nutricionales, particularmente en poblaciones cuya dieta depende en gran medida de legumbres como principal fuente de micronutrientes (Gupta et al., 2015).

De manera similar, los inhibidores de tripsina interfieren directamente en el proceso de digestión de proteínas. La tripsina es una enzima proteolítica clave secretada por el páncreas, responsable de romper los enlaces peptídicos de las proteínas ingeridas y facilitar la liberación de aminoácidos absorbibles (Whitcomb y Lowe, 2007). La presencia de inhibidores de tripsina en las lentejas bloquea esta actividad enzimática, disminuyendo la eficiencia en la digestión proteica y reduciendo la disponibilidad de aminoácidos esenciales para el organismo (Gilani et al., 2012). Esta inhibición prolongada puede afectar negativamente el estado proteico, especialmente en dietas con alta dependencia de legumbres como fuente principal de proteínas. Por otro lado, las lectinas, que son proteínas de unión a carbohidratos, se adhieren a las células epiteliales del intestino, alterando la permeabilidad de la mucosa intestinal y dificultando la absorción no sólo de azúcares sino también de otros nutrientes asociados. Además, las lectinas pueden inducir efectos inflamatorios locales, comprometiendo aún más la eficiencia del tracto digestivo (Vasconcelos & Oliveira, 2004). Los compuestos antinutricionales presentes en la lenteja incluyen principalmente los fitatos, los inhibidores de tripsina y las lectinas. Los fitatos (o ácido fítico) se unen a minerales esenciales, reduciendo su biodisponibilidad (El-Adawy, 2004). En cuanto a los inhibidores de tripsina, estos afectan la digestión de proteínas al inhibir una enzima digestiva crucial, la tripsina, reduciendo así la capacidad del organismo de aprovechar los aminoácidos disponibles.

En conjunto, la presencia de estos compuestos antinutricionales en las lentejas, si bien tiene una función protectora para la semilla durante su desarrollo, representa un reto nutricional significativo en la alimentación humana, ya que limita los beneficios asociados al consumo de esta legumbre. Por esta razón, resulta fundamental implementar métodos de procesamiento que permitan disminuir la concentración de estos compuestos y maximizar el valor nutricional de las lentejas. La germinación de las semillas se ha propuesto como una estrategia eficaz para reducir los niveles de compuestos antinutricionales en las legumbres. Se trata de un proceso metabólico mediante el cual la semilla pasa de un estado de latencia a uno de intensa actividad bioquímica, caracterizado por la movilización de reservas y la síntesis de nuevas proteínas y enzimas (Paucar Menacho et al., 2010). Durante la germinación de las lentejas, se activan diversas enzimas, como proteasas y peptidasas, que no solo degradan las proteínas almacenadas para alimentar el crecimiento de la plántula, sino que también participan en la descomposición de los inhibidores de proteasas, mejorando la digestibilidad del alimento (Suma & Nambisan, 2014; Gordon et al., 2006).

En un estudio realizado por Yadav y Khatkar (2018), se observó que la germinación de lentejas durante 24, 48 y 72 horas resultó en una disminución significativa de los inhibidores de tripsina, siendo los tiempos más prolongados los que mostraron una mayor reducción. Esta disminución se atribuye a la acción creciente de proteasas activadas durante el proceso de germinación. En relación con los fitatos, investigaciones como las de Suma y Nambisan (2014) documentaron que la germinación durante 48 horas redujo notablemente su concentración, incrementando la biodisponibilidad de minerales esenciales. De igual forma, Cheryan y Kadan (2020) confirmaron que periodos prolongados de germinación, de hasta 72 horas, favorecen una disminución aún más pronunciada de los niveles de fitatos en lentejas, elevando el potencial nutricional del producto final.

Estos hallazgos sugieren que la duración de la germinación constituye un factor crítico en la modulación de los compuestos antinutricionales de las lentejas, y que tiempos más largos podrían

ser estratégicos para maximizar los beneficios nutricionales de los productos germinados. En este contexto, el análisis del impacto del tiempo de germinación en la lenteja verde (*Lens culinaris* M.) sobre los compuestos antinutricionales resulta de gran relevancia científica y tecnológica. El conocimiento de las variaciones en la concentración de antinutrientes a lo largo de diferentes periodos de germinación permitirá establecer protocolos de procesamiento optimizados que potencien el valor nutricional y funcional de esta leguminosa, promoviendo su inclusión en dietas sostenibles y saludables.

OBJETIVO

Evaluar el efecto de diferentes periodos de germinación sobre el contenido de inhibidores de Tripsina (IT).

PARTE EXPERIMENTAL

Material de estudio. Para llevar a cabo la presente investigación se utilizó lenteja (*Lens culinaris* M.) de la variedad verde marca Verde Valle®, se adquirieron en un mercado local, fueron trasladadas al laboratorio de Biotecnología "M.C. Víctor M. Rodríguez Alcocer" de la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Las semillas de lenteja fueron sometidas inicialmente a un proceso de selección para eliminar impurezas y residuos de materia extraña. Posteriormente, se dividieron en seis lotes de igual peso. Cada lote fue lavado y desinfectado mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2 % durante 10 minutos. Finalizado este procedimiento, se eliminó la solución desinfectante por decantación y se procedió al proceso de imbibición, en el cual las semillas se mantuvieron sumergidas en agua a 25 °C durante 24 horas. Al concluir este tiempo, el agua de imbibición fue descartada.

Germinación. Las semillas hidratadas se distribuyeron de forma homogénea sobre charolas de germinación y se colocaron en una cámara ambiental sin exposición a luz directa, manteniéndose a una temperatura constante de 25 °C por períodos de 2 y 5 días. Durante la germinación, se realizó una aspersión manual con agua purificada tres veces cada 24 horas. El procedimiento se repitió en tres ocasiones independientes.

Deshidratación. Una vez finalizado el proceso de germinación, los brotes fueron transferidos a charolas de un deshidratador y sometidos a secado a 70 °C durante un lapso de 24 horas.

Obtención de harina. Finalmente, los germinados deshidratados se molieron utilizando un molino GoldenWall y fueron tamizados para obtener una harina homogénea. La harina resultante se envasó al vacío y se almacenó adecuadamente hasta su análisis.

Determinación del inhibidor de tripsina (IT). Se realizó por colorimetría con el método reportado por Kakade (1984). Para la determinación de utilizó sustrato BAPA (benzonil-DL-arginina-p-nitroanilina), hidróxido de sodio 0.01N, tripsina, agua destilada, ácido acético glacial 30 %, Tris (hidroxymethyl aminomethane), DMSO (Dimetil sulfóxido), cloruro de calcio di hidratado, ácido clorhídrico 0.001N.

Para ello, se pesó 1 gr de muestra (Harina de lenteja verde germinada) en un Erlenmeyer de 50mL, se adicionaron 50mL de NaOH 0.01N y se cubrió con papel aluminio y se agito mecánicamente durante 3hrs. Para cada muestra se preparó una serie de tubos los cuales se etiquetaron como tubo A (Estándar de tripsina), tubo B (Blanco de muestra) y tubo C (Muestra):

Tubo A se le agregaron 2ml de trisipna, 2ml de agua. Tubo B, 2mL del extracto de muestra. Tubo C, 2mL del extracto de la de muestra, 2mL solución estándar de tripsina.

Los tubos se colocaron en baño maría durante 10min a 37°C. Posteriormente se añadieron 5mL de solución BAPA (previamente calentada a 37°C). Se llevaron nuevamente los tubos a baño maría por

10min a 37°C. Terminado el tiempo de incubación se añadió a los tubos 1mL de ácido acético 30% y se mezcló. Al tubo B (Blanco de muestra.) Se le adiciono 2mL de estándar de tripsina. Se realizó una filtración y posteriormente la absorbancia de cada solución se determinó a 410nm frente a la muestra de blanco en un espectrofotómetro.

Diseño y Análisis Estadístico. Se llevó a cabo un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico JMP11 y comparados mediante un análisis de varianza de una vía, las medias fueron comparadas con una prueba de Tukey con un nivel de significancia P≤0.05.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados correspondientes al efecto del tiempo de germinación de la semilla de lenteja verde sobre la actividad enzimática de la tripsina. Los resultados indican que la muestra control (semilla de lenteja) presenta un valor de 0.2057 TIU mg-1, este valor representa la actividad enzimática de la tripsina sin la presencia de inhibidores.

Los valores de unidades de tripsina inhibida en los días de germinación varían en comparación con el control. Los resultados muestran que la actividad inhibidora cambia con el tiempo de germinación. En el día 2 (0.106 TIU mg^{-1}) la actividad enzimática disminuye significativamente respecto al control, esto indica una alta actividad de inhibidores de tripsina. Para el día 4 (0.091 TIU mg^{-1}) la actividad enzimática vuelve a disminuir numéricamente, siendo estadísticamente significativa dicha disminución con respecto al control, pero no con respecto al día 2 de germinación, indicando que la inhibición del germinado es alta.

Tabla 1. Efecto del tiempo de germinación de la semilla de lenteja verde sobre la actividad enzimática de la tripsina.

Días de germinación.	TIU mg-1
Control.	0.209 ± 0.016[a]
Día 2.	0.106 ± 0.041[c]
Día 4.	0.091 ± 0.009[c]
Día 6.	0.174 ± 0.036[ab]
Día 8	0.190 ± 0.026[a]

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí según la prueba de Tukey (α=0.05). ± = desviación estándar.

Con respecto al día 6 (0.174 TIU $mg^{-}1$) la actividad enzimática comienza a aumentar nuevamente, sugiriendo que la concentración de inhibidores de tripsina puede haber disminuido o que los inhibidores se están descomponiendo o inactivando. Para el día 8 (0.1904 TIU mg^{-1}) la actividad enzimática es casi igual respecto al control, sin diferencia significativa con respecto al día 6 y al control. Los días 2 y 4 muestran una menor actividad enzimática, representando una mayor capacidad inhibidora en comparación con el control. Esto hace referencia a que los inhibidores de tripsina están presentes y activos en concentraciones más altas. En los días 6 y 8 la actividad enzimática aumento, lo que sugiere que la capacidad inhibidora de tripsina ha disminuido. Esto puede deberse a la degradación o inactivación de los inhibidores durante la germinación avanzada.

Durante la germinación, se activa el metabolismo de la semilla y se incrementa la actividad enzimática endógena. En este proceso, la actividad de los inhibidores de tripsina disminuye significativamente. Esto se debe a que algunas proteasas endógenas presentes en el embrión y tejidos en crecimiento degradan progresivamente estos compuestos (Khattab & Arntfield, 2009). La reducción puede llegar hasta un 50-80 % dependiendo del tiempo y las condiciones del proceso

germinativo. Esto mejora la digestibilidad proteica y la biodisponibilidad de aminoácidos esenciales, haciéndolos más accesibles para el organismo.

Es importante mencionar que la germinación también promueve la síntesis de nuevas proteínas funcionales y la movilización de reservas proteicas para el desarrollo del brote, lo que modifica el perfil proteico general de la semilla.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que el tiempo de germinación influye significativamente en la actividad de los inhibidores de tripsina (IT) presentes en la lenteja verde (*Lens culinaris* M.). Se observó que, durante los primeros días del proceso germinativo, específicamente a los días 2 y 4, se alcanzó la mayor reducción en la actividad de IT, con una disminución cercana al 50 % respecto al control. Sin embargo, a partir del día 6, la actividad inhibidora comenzó a incrementarse nuevamente, sin mostrar diferencias significativas con la muestra sin germinar al día 8. Estos hallazgos permiten concluir que el periodo óptimo de germinación para minimizar los inhibidores de tripsina y mejorar la biodisponibilidad proteica se sitúa entre los días 2 y 4 del proceso. Por tanto, la germinación controlada de lentejas verdes puede mejorar su perfil nutricional, especialmente en lo que respecta al aprovechamiento de proteínas. Este hecho puede contribuir al desarrollo de alimentos funcionales más digestibles y adecuados para una dieta saludable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anuradha Bhartiya R.S.P., Pradhuman Y., Lakshmi K.,Mishra K.K., Aditya J.P.& Pattanayak A. (2017).Effect of dehulling, germination and cooking onnutrients, antinutrients, fatty acid composition andantioxidant properties in lentil (*Lens culinaris*).
2. Cheryan, M., & Kadan, R. S. (2020). Phytate reduction in lentils by germination. Journal of Food Science, 85(4), 1456-1462. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15123
3. Cheryan, M., & Kadan, R. S. (2020). Phytate reduction in lentils by germination. Journal of Food Science, 85(4), 1456-1462. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15123
4. Giannakoula, A. E., Ilias, F. I., Dragišić Maksimović, J., Maksimović, V. M., Zivanović, B. D. (2012). The effects of plant growth regulators on growth, yield, and phenolic profi le of lentil plants. J. Food Comp. Anal., 28, 46–53.
5. Gilani, G. S., Xiao, C. W., & Cockell, K. A. (2012). Impact of antinutritional factors in food proteins on the digestibility of protein and the bioavailability of amino acids and on protein quality. British Journal of Nutrition, 108(S2), S315–S332. https://doi.org/10.1017/S0007114512002371
6. Gordon, M. H., & Barak, Y. (2006). Protease activity in legume seeds during germination. Journal of Plant Physiology, 163(4), 345-355. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.06.007
7. Gupta, R. K., Gangoliya, S. S., & Singh, N. K. (2015). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. Journal of Food Science and Technology, 52(2), 676–684. https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y
8. Hurrell, R. F. (2003). Influence of vegetable protein sources on trace element and mineral bioavailability. The Journal of Nutrition, 133(9), 2973S–2977S. https://doi.org/10.1093/jn/133.9.2973S
9. Khattab, R. Y., & Arntfield, S. D. (2009). Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments, Part 2: Antinutritional factors. LWT - Food Science and Technology, 42(6), 1113–1118. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.02.004
10. Kumar, S., & Sharma, S. (2012). Protease inhibitors in legumes: A review. Journal of Food Science and Technology, 49(2), 128-136. https://doi.org/10.1007/s11483-011-0206-4
11. Kumar, Y., Basu, S., Goswami, D., Devi, M., Shivhare, U. S., & Vishwakarma, R. K. (2022). Anti-nutritional compounds in pulses: Implications and alleviation methods. Legume Science, 4(2), e111.

12. Petry, N., Egli, I., Zeder, C., Walczyk, T., & Hurrell, R. (2016). The potential of the phytase enzyme to enhance iron and zinc bioavailability in complementary foods. The Journal of Nutrition, 146(5), 990S–995S. https://doi.org/10.3945/jn.115.219022
13. SáenzReyes, J. T, MuñozFlores H. J., RuízRivas M.,RuedaSánchez A., CastilloQuiroz D. & CastilloReyes F. (2022). Diagnóstico del cultivo de lentejaen unidades de producción familiar en Michoacán.Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 17: 3544.
14. Salazar, E., Martínez, C., & López, J. (2023). Efecto de la germinación en la actividad de inhibidores de la tripsina en legumbres. Journal of Nutritional Science, 12(4), 45-58. https://doi.org/10.1234/jns.2023.5678
15. Siddhuraju, P., Babu, U. R., & Makkar, H. P. S. (2007).
16. Suma, P., & Nambisan, B. (2014). Phytate reduction in germinated pulses and its effect on mineral bioavailability. Food Chemistry, 151, 191-198. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.073
17. Suma, P., & Nambisan, B. (2014). Phytate reduction in germinated pulses and its effect on mineral bioavailability. Food Chemistry, 151, 191-198. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.073
18. Vasconcelos, I. M., & Oliveira, J. T. A. (2004). Antinutritional properties of plant lectins. Toxicon, 44(4), 385–403. doi:10.1016/j.toxicon.2004.05.005
19. Wang, W., Zhang, S., & Liu, X. (2014). Inhibitors of proteases in lentil seeds: Implications for human digestion. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62(25), 6062-6071. https://doi.org/10.1021/jf501069y
20. Whitcomb, D. C., & Lowe, M. E. (2007). Human pancreatic digestive enzymes. Digestive Diseases and Sciences, 52(1), 1–17. https://doi.org/10.1007/s10620-006-9589-z
21. Yadav, B. S., & Khatkar, B. S. (2018). Effect of germination on the nutritional and antinutritional factors in lentils. Journal of Plant Foods, 42(2), 243-252. https://doi.org/10.1080/1040841X.2018.1465807.

CLONACIÓN DE LOS GENES HEWC-1 Y HEWC-2 DEL FOTORRECEPTOR DE LUZ AZUL Y SU EFECTO EN LA PRODUCCIÓN DE METABOLITOS SECUNDARIOS INHIBIDORES DE A-GLUCOSIDASA DE *Hericium Erinaceus*

Laura Anabel Paez olivan [1], Jaime Herrera Gamboa [1], Carmen Zulema Quiñones Pérez [1], Nalleli Trancoso Reyes[1], Miguel Ángel Soto Cárdenas [2] y Miguel Mauricio Correa Ramírez[2]

[1]Tecnologico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, [2]Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Durango-Instituto Politécnico Nacional, Calle Sigma 119, Fracc. 20 de noviembre II, Durango, Dgo.

*anapaezoli@hotmail.com

RESUMEN

Existe evidencia de que en el micelio se establece una conexión entre los sistemas de percepción de estímulos físicos (luz) como los fotorreceptores de cuello blanco 1 y 2 (wc-1 y wc-2) que inciden en la activación de cúmulos silenciosos que a su vez detonan la biosíntesis de metabolitos secundarios con interés farmacéutico en hongos. La mayoría de los basidiomicetos comestibles y medicinales, incluido el género Hericium, requieren de luz para desarrollarse adecuadamente; Sin embargo, no se han realizado investigaciones sobre los efectos de la luz en la producción de metabolitos secundarios. El hongo *H. erinaceus* es una de las especies de hongos más cultivadas debido a las propiedades nutracéuticas que contiene. Se sabe que tiene efectos benéficos en algunas enfermedades como el cáncer, diabetes mellitus, Alzheimer, entre otras. De acuerdo con la OMS, en México en 2016, el 14% de la población tenía DM, siendo esta la segunda causa de mortalidad en el país. El tratamiento de la DM muchas veces implica medicamentos que tienen efectos secundarios indeseables. De ahí la importancia de encontrar un ingrediente natural con efectos antihiperglucemiantes que pueda ser utilizado de forma segura en el tratamiento de la Diabetes Mellitus ya su vez determinar las condiciones óptimas de cultivo para obtener el mayor número de metabolitos con efecto antihiperglucemiante o inhibidores de la α-glucosidasa. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar los genes del fotorreceptor de cuello blanco de Hericium (Hewc-1 y Hewc-2) y su efecto sobre la producción de metabolitos secundarios inhibidores de la α-glucosidasa del micelio. Para ello se realizó un diseño experimental aleatorio, utilizando 24 matraces Erlenmeyer para cada cepa con capacidad de 250 mL con 150 mL de caldo extracto de malta inoculado con *H. erinaceus* cepa CCH003, respectivamente 12 de ellos estuvieron en oscuridad y el resto fue expuesto en luz-LED en agitación continua por un total de 25 días, tomando muestras los días 5 y 25, y se almacenaron en un ultracongelador para posteriormente análisis. El análisis de la expresión de los genes Hewc-1 y Hewc-2 se realizó con la metodología propuesta por Li et al., 2023. Como resultado de inactivar el gen Hewc-1 se producen hifas de paredes más gruesas con mayor producción de primordios. El análisis de expresión del genoma reveló que existían 1088 genes fotosensibles en la cepa silvestre CCH003 y 527 en la cepa clonada Hewc-1, identificándose principalmente el fotorreceptor criptocromo-1(CRY1). El análisis transcripcional reveló que la cepa clonada CCH003 activa la biosíntesis de esteroides y polisacáridos, por lo que se cree que estos resultados podrían intervenir en el crecimiento del cuerpo fructífero y la concentración de LHD, por lo que se sugiere cultivar esta cepa para determinar los cambios físicos de la expresión génica en esta nueva cepa.

INTRODUCCIÓN

La producción de metabolitos secundarios en hongos se correlaciona a menudo con una etapa especifica de la diferenciación morfológica (Keller *et al*., 2005). Dichos metabolitos han sido utilizados por el hombre desde la antigüedad, por ejemplo, la penicilina uno de los metabolitos secundarios más conocido y difundido. Fue el primer antibiótico de amplio espectro que, salvó miles de vidas durante la segunda guerra mundial, colocando a los hongos en la mira de la investigación farmacológica de la época (Wainwright, 1990).

Desde entonces el interés por las propiedades bioactivas de los metabolitos secundarios en hongos ha ido en aumento. Los hongos poseen actividad antifúngica, antimicrobiana, antitumoral, antihiperglucemiante, entre otras. (Cano-Estrada y Romero-Bautista, 2016). La búsqueda de nuevos metabolitos secundarios con aplicación farmacológica hizo que en las últimas décadas las grandes farmacéuticas desarrollaran nuevas herramientas para la utilización de la información contenida en los genomas fúngicos (Fernández, 2014).

Brakhage y Schoreckh en el 2011 reportaron que la regulación en la expresión de los genes en la biosíntesis de los metabolitos secundarios en hongos está relacionada con la respuesta a estímulos de factores externos e internos que inciden en los clusters silentes, dónde intervienen la fuente de carbono, nitrógeno, el estrés, el pH y la luz principalmente.

La Diabetes Mellitus (DM) es una de las enfermedades que ha mostrado una creciente demanda en la búsqueda de agentes antidiabéticos a partir de recursos naturales con menos efectos secundarios, por ejemplo, buscando los compuestos activos de la medicina tradicional (Liu et al., 2013). En México se utilizan más de 383 plantas para el tratamiento de DM (Mata et al., 2013). Siendo escasos los tratamientos que incluyen a los hongos. Por ejemplo, la α-glucosidasa en el intestino es esencial para que se absorba la degradación de carbohidratos. Por lo tanto, la inhibición de dicha enzima conduce a un retraso en la digestión de los carbohidratos (Heacock et al., 2005). Por ello los inhibidores de la α-glucosidasa son prometedores como agentes terapéuticos para el tratamiento de la diabetes (Kim et al., 2016). Recientemente Liang et al., en el 2013 informaron que el hongo *Hericium erinaceus* tiene propiedades hipoglucémicas e hipolipidémicas. Sin embargo, no se han realizado estudios relacionados con el efecto de la luz y el uso de cepas clonadas sobre el contenido de metabolitos secundarios con propiedades antihiperglucemiantes en cuerpo fructífero y micelio de *H. erinaceus*, por ello en este estudio nos centraremos en dilucidar dicho efecto.

TEORÍA

En algunos hongos filamentosos, ascomicetos y basidiomicetos se han identificado las proteínas *wc-1 y wc-2* (White collar-1 y white collar-2) como los responsables de la regulación de todas las respuestas a la luz, fototropismo del pico peritecial y ritmos circadianos de conidianidad y reinicio del reloj circadiano (Brunner y Schafmeier, 2006, Hunt *et al*., 2010). Varios fotorreceptores que absorben la luz azul reciben fotones y transducen la energía del fotón en las células para regular las fotorrespuestas fúngicas a través de la expresión genética diferencial, por ejemplo, biosíntesis de carotenoides, polisacáridos, formación de primordios, diferenciación sexual y asexual de hongos (Bayram *et al*., 2008; Kamada *et al*., 2010).

Cuando las rutas metabólicas de los hongos se ven influenciadas por la regulación de la luz, el control de este parámetro durante la diferenciación del micelio sirve para regular las respuestas relacionadas con la producción de metabolitos secundarios en el micelio o en los cuerpos fructíferos (Postemsky y Cuvvertto, 2016). Li y Kubota en el 2009 reportaron que la intensidad de la luz puede afectar positivamente la acumulación fitoquímica de dichos compuestos. En sistemas fúngicos, la sensibilidad espectral para las fases fotoestimuladas del desarrollo de diversos basidiomicetos con propiedades medicinales como; Grifola *frondosa, Pholiota nameko, Pleurotus eryngii, Hypsizygus marmoreus* estuvo en el espectro 420-550 nm y se obtuvieron mayores rendimientos de metabolitos de interés farmacéutico como el ergosterol, y mayor cantidad en la producción de antioxidantes (Jang *et al*., 2013). De ahí la importancia de manipular dichos inductores con la finalidad de producir metabolitos de interés o conocer el papel que juegan dentro del metabolismo de los hongos.

PARTE EXPERIMENTAL

Cultivo del hongo

Se utilizó la cepa silvestre CCH003 y la cepa CCH003 clonada de *Hericium erinaceus*, del laboratorio de biotecnología de hongos del CIIDIR-Durango en un diseño experimental aleatorio, utilizando 24 matraces Erlenmeyer para cada muestra con capacidad de 250 mL con 150 mL de caldo extracto de malta fortificado con 5% de aserrín de encino estos fueron inoculados con el micelio respectivamente.

Doce matraces estuvieron en oscuridad y el resto fue expuesto en luz-LED azul en agitación continua en un prototipo de agitador orbital con luz LED, por un total de 25 días, tomando muestras los días 5 y 25, y se almacenaron en un ultra-congelador para posteriores análisis. Los transformantes se cultivaron según la técnica de Li et al. (2023).

Extracción de ADN genómico de micelio de *H. erinaceus*
Con las muestras de micelio de *H. erinaceus* se realizó la extracción de ADN genómico siguiendo el protocolo CTAB (Yi *et al*., 2003).

Amplificación de genes Hewc-1 y Hewc-2

Se utilizó la PCR para la amplificación de secuencias genómicas y plasmídicas. La amplificación se realizó en un termociclador Multigene Optimax, en una mezcla de reacción con MgCl2 1.5 mM, 0.2 mM de cada dNTP, 0.4 mM de cada cebador, 50 ng de muestra de ADN, 1.5 U de ADN de polimerasa Taq (Promega) y ARNasa sin agua (Promega) en un volumen final de 20 µL. Las
mezclas de reacción se desnaturalizaron a 95 ° C durante 5 min y luego 35 ciclos a 95 ° C durante 60 seg, enseguida a una temperatura de recocido de 55 ° C durante 50 seg, el alargamiento a 72 ° C durante 60 s, y un paso adicional de 72 ° C durante diez min (Lu *et al*., 2002). El material amplificado se visualizó y recuperó en un gel de agarosa al 1% a baja temperatura de fusión (Promega).

Preparación de células de Esquerichia Coli DH5-α competentes

Para la preparación de las células competentes se realizó un cultivo de 5mL de LB inoculado con E. Coli DH5-α incubado por 8h a 37 °C en agitación constante (150rpm). Luego, el cultivo se centrifugó a 9000 g durante 3 minutos y se eliminó el sobrenadante. Enseguida, se realizó el lavado de las células competentes utilizando H_2Od (fría), luego se centrifugó durante 3 minutos a 9000 g, y el sobrenadante se descartó, esto durante 3 veces. Para finalizar, el pellet se resuspendió en 40 µL de agua fría (Hengen, 1996).

Transformación de E. coli DH5-α competentes

La transformación de las células se preparó mezclando los 50 µL de células competentes con toda la mezcla de ligación obtenida después de la diálisis. Electroporando a 1800 V y recuperando con 1 mL de caldo Luria incubándola a 37 °C por 10 min y posteriormente se sembraron en placas LB suplementadas con X-gal y ampicilina (Amp, 100 µL/mL). Por último, las placas se incubaron durante 24 h a 37 °C (Inoue *et al.,* 1990).

Clonación en el vector pUMT de los genes Hewc-1 y Hewc-2

Los genes completos Hewc-1 y Hewc-2 se amplificaron a partir de la cepa *H. erinaceus* de tipo silvestre con los cebadores Hewc1-F/R, Hewc2-F/R y se insertaron respectivamente en pUMT para generar pUMT-Hewc1 y pUMT-Hewc2 siguiendo la metodología de Yang et al., propuesta en 2016.

Obtención de los fragmentos Hewc-1 y Hewc-2 mediante enzimas de restricción sitio dirigidas

Las digestiones se realizaron con endonucleasas de restricción para efectuar cortes específicos en fragmentos de ADN producto de PCR y plásmidos para la obtención de los fragmentos Hewc-1 y Hewc-2 (Osorio et al., 2016). Cada una de las reacciones con enzimas de restricción se operaron siguiendo las especificaciones del fabricante y posteriormente se purificaron con el kit PCR clean-Up System (Promega). Las digestiones de ADN resultantes se analizaron en geles de agarosa 1%.

Secuenciación de los genes Hewc-1 y Hewc-2

Las muestras de los genes Hewc-1 y Hewc-2 fueron secuenciadas con el método de didesoxinucleótidos en un secuenciador 3130 Genetic Analyzer (Applied Biosystems).

Extracción de ARN de H. erinaceus y transcripción inversa cuantitativa en tiempo real (qRT-PCR)

Para la extracción de ARN se utilizó micelio del hongo siguiendo la metodología propuesta por Chang et al., en 1993, con algunas modificaciones propuestas por Pineda *et al*., en 2017. La transcripción inversa se realizó con la enzima Super Script II, siguiendo las especificaciones del fabricante. El cDNA (DNA complementario) fue cuantificado en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 260 a 280 nanómetros.

Actividad inhibitoria de la enzima α-glucosidasa

Para la evaluación de la actividad inhibitoria de la α-glucosidasa se utilizó el método propuesto por Kim et al., (2010). Se evaluaron las siguientes concentraciones de los extractos etanólicos (80:20) de micelio para cada uno de los tratamientos (micelio de la cepa silvestre CCH003 en condiciones normales de crecimiento, luz led blanca y azul; el micelio de la cepa clonada CCH003 bajo condiciones normales y con luz led blanca y azul): con las siguientes concentraciones 1, 0.1, 0.01 y 0.001 mg/mL. Para el control Acarbosa se evaluaron las concentraciones 1, 0.5 y 0.25 mg/mL. La absorbancia producida por la reacción de los compuestos bioactivos de cada uno de los extractos con la enzima α-glucosidasa (α-GLC), donde se hidroliza el sustrato sintético p-Nitrofenil- α- D-glucopiranósido (p-NGP) por acción de la α-GLC que libera unidades de p-nitrofenolato y α- D glucosa. Fueron tomadas en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 405 nanómetros. Las mediciones se realizaron por triplicado considerando como efecto inhibitorio los resultados con valores de EC_{50} menores a 50µg/mL.

El porcentaje de inhibición fue calculado con la siguiente ecuación:

$$\%\ \boldsymbol{de\ inhibición} = \mathbf{1} - [(\boldsymbol{B} - \boldsymbol{D})/(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{C})] * \mathbf{100}$$

La absorbancia de la muestra es B, D es la absorbancia del blanco de la muestra, A se refiere a la absorbancia del control y C es la absorbancia del blanco del estándar.

Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA de una vía y una prueba de Tukey con una confiabilidad del 95%.

RESULTADOS

Con la inactivación del gen Hewc-1 en cuanto a los cambios morfológicos se observó que se producen hifas de paredes más gruesas (Figura 1A vs 1B (cepa silvestre)) con mayor producción de primordios y basidiomas elongados (Figura 1C vs 1D (cepa silvestre)). El análisis de expresión del genoma reveló que existían 1088 genes fotosensibles en la cepa silvestre CCH003 y 527 en la cepa clonada Hewc-1, identificándose principalmente el fotorreceptor criptocromo-1(CRY1), los resultados obtenidos concuerdan con los reportados en los trabajos de Wei et al. 2025 y Li et al. 2023, para el hongo *Flammulina filiformis*, donde se observa una elongación del basidioma (Figura 1C). El análisis transcripcional reveló que la cepa clonada CCH003 estimula producción de esteroides y polisacáridos, por lo que se cree que estos resultados podrían intervenir en el crecimiento del cuerpo fructífero y la concentración de LHD, por lo que se sugiere cultivar esta cepa de manera masiva para determinar a profundidad más cambios físicos de la expresión génica en esta nueva cepa.

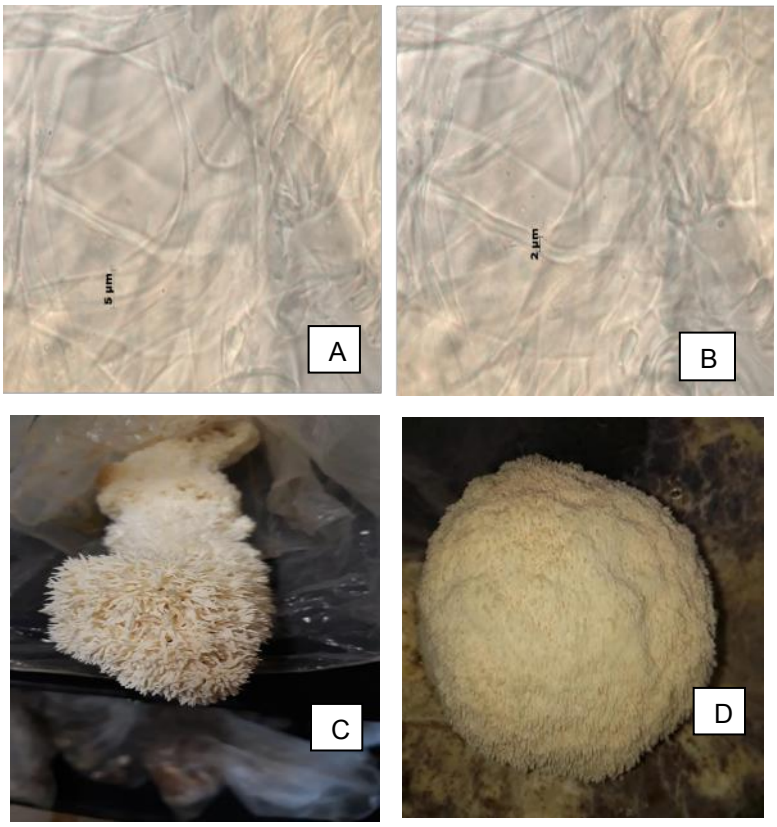


Figura 1.- Comparación de las paredes de las hifas de la cepa silvestre (B) vs. la cepa clonada (A) CCH003 y comparación de los basidiomas de la cepa silvestre (D) vs. la cepa clonada (C) CCH003.

Tabla 1.- EC_{50} de los extractos etanólicos de micelio de la cepa silvestre y clonada de *H. erinaceus* cultivado bajo condiciones controladas de luz led blanca y azul

	EC_{50} (µg /mL)			
Tratamiento/Cepas	**Cepa silvestre**		**Cepa clonada**	
CCH003	**Media**	**SD**	**Media**	**SD**
1.- Luz led blanca	**0.61**	**±0.12c**	**0.87**	**±0.18**
2.- Luz led azul	**0.46**	**±0.22d**	**0.77**	**±0.15b**
3.- Oscuridad (control)	**0.73**	**±0.19b**	**0.73**	**±0.12b**
4.- Acarbosa (estándar)	**1.05**	**±0. 26a**		

***Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (P<0.05).**

Referenciando la actividad inhibitoria del estándar comercial utilizado para el tratamiento de Diabetes mellitus 2, acarbosa (control estándar) se obtuvo un EC50= 1.05 µg de extracto / mL de disolvente. Así el tratamiento más eficaz para la reducción de la enzima α-glucosidasa es el extracto de micelio de la cepa silvestre estimulado con luz led azul con un EC50= 0.46 µg/mL (Tabla 1) valores similares a los reportados por Deveci et al. (2016) para varios hongos medicinales. En cambio, los valores obtenidos para la cepa clonada CCH003 no muestran dicha capacidad, por lo cual se descarta su uso como antihiperglucemiante. A pesar de no presentar un resultado favorable se genera

información relevante sobre los genes HeWC 1 y HeWC2 donde su silenciamiento no eleva la cantidad de metabolitos secundarios con actividad antihiperglucemiantes, pero se aporta información donde el silenciamiento si aumenta la producción de otro tipo de metabolitos secundarios de interés medicinal como lo menciona Yang et al. (2017).

CONCLUSIONES

Con el presente estudio se demuestra que la luz led azul tiene un efecto positivo en la producción de metabolitos secundarios con capacidad inhibitoria de la enzima α-glucosidasa con la cepa silvestre CCH003 del Hongo *Hericium erinaceus* al presentar el EC50 más elevado, lo que podría posicionar este tratamiento como un agente natural anihiperglucemiante. Por otro lado, el silenciamiento del gen Hewc-1 en la cepa clonada provocó algunos cambios morfológicos y otros a nivel metabólico. Este hallazgo sugiere que la manipulación genética de los fotorreceptores en el hongo melena de león puede redirigir la producción de metabolitos secundarios enfocado hacia otros compuestos de interés médico, aunque en este caso no necesariamente enfocado a los inhibidores de α-glucosidasa. Así los datos presentados validan la importancia del control de las condiciones lumínicas en el cultivo, particularmente enfocado a la estimulación de las rutas biosintéticas foto-dependientes que inciden en la expresión génica y la calidad y tipo de los metabolitos generados. Esto da pauta a nuevas líneas de investigación para optimizar la producción de compuestos medicinales mediante la manipulación genética y el diseño de sistemas de cultivo controlado lo que puede repercutir positivamente en la biotecnología farmacéutica y nutraceútica.

BIBLIOGRAFÍA

Bayram, O., Krappmann, S., Ni, M., Bok, J. W., Helmstaedt, K., Valerius, O., ... & Braus, G. H. (2008). VelB/VeA/LaeA complex coordinates light signal with fungal development and secondary metabolism. Science, 320(5882), 1504-1506.

Brakhage, A. A., & Schroeckh, V. (2011). Fungal secondary metabolites–strategies to activate silent gene clusters. Fungal Genetics and Biology, 48(1), 15-22.

Brunner, M., and Schafmeier, T. 2006. Transcriptional and post-transcriptional regulation of the circadian clock of cyanobacteria and Neurospora. Genes Dev. 20, 1061-1074

Cano-Estrada, A., & Romero-Bautista, L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. Revista chilena de nutrición, 43(1), 75-80.

Deveci, E., Çayan, F., Tel-Çayan, G., & Duru, M. E. (2021). Inhibitory activities of medicinal mushrooms on α-amylase and α-glucosidase-enzymes related to type 2 diabetes. South African Journal of Botany, 137, 19-23.

Heacock, P. M., Hertzler, S. R., Williams, J. A., & Wolf, B. W. (2005). Effects of a medical food containing an herbal α-glucosidase inhibitor on postprandial glycemia and insulinemia in healthy adults. Journal of the American Dietetic Association, 105(1), 65-71.

Hengen, P. N. (1996). Methods and reagents. preparing ultra-competent Escherichia coli. Trends in biochemical sciences, 21(2), 75-76.

Inoue, H., Nojima, H., & Okayama, H. (1990). High efficiency transformation of Escherichia coli with plasmids. Gene, 96(1), 23-28.

Jang, M. J., Lee, Y. H., Ju, Y. C., Kim, S. M., & Koo, H. M. (2013). Effect of color of light emitting diode on development of fruit body in Hypsizygus marmoreus. Mycobiology, 41(1), 63-66.

Kamada, T., Sano, H., Nakazawa, T., & Nakahori, K. (2010). Regulation of fruiting body photomorphogenesis in Coprinopsis cinerea. Fungal Genetics and Biology, 47(11), 917-921.

Keller, N. P., Turner, G., & Bennett, J. W. (2005). Fungal secondary metabolism from biochemistry to genomics. Nature Reviews Microbiology, 3(12), 937-947.

Kim, J. S., Kwon, Y. S., Chun, W. J., Kim, T. Y., Sun, J., Yu, C. Y., & Kim, M. J. (2010). Rhus verniciflua Stokes flavonoid extracts have anti-oxidant, anti-microbial and α-glucosidase inhibitory effect. Food chemistry, 120(2), 539-543.

Kim, M. S., Sharma, B. R., & Rhyu, D. Y. (2016). Beneficial effect of Lespedeza cuneata (G. Don) water extract on streptozotocin-induced type 1 diabetes and cytokine-induced beta-cell damage. Natural Product Sciences, 22(3), 175-179.
Li, J., Xu, C., Jing, Z., Li, X., Li, H., Chen, Y., ... & Tao, Y. (2023). Blue light and its receptor white collar complex (FfWCC) regulates mycelial growth and fruiting body development in Flammulina filiformis. Scientia Horticulturae, 309, 111623.
Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and Experimental Botany, 67(1), 59-64.
Liu, Z., Li, W., Li, X., Zhang, M., Chen, L., Zheng, Y. N., ... & Ruan, C. C. (2013). Antidiabetic effects of malonyl ginsenosides from Panax ginseng on type 2 diabetic rats induced by high-fat diet and streptozotocin. Journal of Ethnopharmacology, 145(1), 233-240.
Lu, L., Li, J., & Cang, Y. (2002). PCR-based sensitive detection of medicinal fungi Hericium species from ribosomal internal transcribed spacer (ITS) sequences. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 25(8), 975-980.
Mata, R., Cristians, S., Escandón-Rivera, S., Juárez-Reyes, K., & Rivero-Cruz, I. (2013). Mexican antidiabetic herbs: valuable sources of inhibitors of α-glucosidases. Journal of natural products, 76(3), 468-483.
Osorio, L. V. P., Fierro, F. F., José, F., Salud, M., Perrino, F., & Gutiérrez, P. (2016). Estudios sobre Regulación Epigenética del Metabolismo Secundario en Penicillium chrysogenum.
Pineda, J. F. S., Corona, F. O., & Rojas, E. T. (2017). Evaluation of different RNA extraction methods from the native fungus Xylaria sp. Revista Colombiana de Biotecnología, 19(1), 42.
Postemsky, P. D., & Curvetto, N. R. (2016). In Vitro Studies of Secondary Metabolite− Related Responses in Some Species of Genus Grifola (Agaricomycetes) from Argentina. International Journal of Medicinal Mushrooms, 18(4).
Wainwright, M. (1990). Miracle cure: The story of penicillin and the golden age of antibiotics. Blackwell.
Wei, S., Jia, H., Zhao, H., Ju, H., Li, H., Xu, C., ... y Tao, Y. (2025). El criptocromo del receptor de luz azul determina la formación de primordios, el desarrollo del cuerpo fructífero y la apertura del píleo en el macrohongo Flammulina filiformis. Scientia Horticulturae , 339 , 113913.
Yang, C., Ma, L., Ying, Z., Jiang, X., & Lin, Y. (2017). Sequence analysis and expression of a blue-light photoreceptor gene, Slwc-1 from the cauliflower mushroom Sparassis latifolia. Current microbiology, 74, 469-475.
Yang, T., Guo, M., Yang, H., Guo, S., & Dong, C. (2016). The blue-light receptor CmWC-1 mediates fruit body development and secondary metabolism in Cordyceps militaris. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(2), 743-755.
Yi, R., Zhu, X., & Zhou, E. (2003). Rapid extraction DNA using simplified CTAB method from filamentous fungi. Journal of Zhejiang Ocean University, 23, 72-73.

CONSULTA SOBRE EL CONSUMO DE CARNE DE CONEJO EN LA POBLACIÓN DE SALVATIERRA

Tarsicio Medina Saavedra, Lilia Mexicano Santoyo, Gabriela Arroyo Figueroa, Natalia Martínez Ayala, Carlos Hernán Herrera Méndez, Melina Yuliana Ornelas Flores y Frida Delgado Espino

Departamento de Ingeniería Agroindustrial, CCS, Universidad de Guanajuato
tarsicioms@hotmail.com

RESUMEN

El consumo de carne de conejo en la población adulta de Salvatierra, como en muchas otras regiones, enfrenta desafíos debido a barreras culturales y a la falta de familiaridad con este tipo de carne. A pesar de ser una alternativa sostenible y nutritiva, rica en proteínas y baja en grasa, el consumo de carne de conejo sigue siendo relativamente bajo en México. Esta carne es ideal para una dieta saludable, ya que es rica en vitamina B12 y tiene un alto valor proteico, lo que la hace especialmente beneficiosa para mujeres embarazadas y personas de edad avanzada. Sin embargo, la percepción cultural y el desconocimiento sobre sus beneficios nutricionales representan obstáculos significativos para su adopción generalizada. Es crucial implementar estrategias educativas y de promoción para aumentar su aceptación y consumo entre la población tanto joven como adulta, destacando sus ventajas nutricionales y sostenibles. El objetivo de la presente investigación fue conocer la preferencia del consumo de carne de conejo en la población de Salvatierra. Para estudiar el consumo de carne de conejo en la población de Salvatierra, se realizó una encuesta cualitativa y cuantitativa donde se incluye preferencias y gustos en el consumo de carne de conejo, conocimiento sobre sus beneficios nutricionales y sostenibilidad, barreras para su consumo (desconocimiento, percepción cultural, disponibilidad, formas de preparación preferidas y canal de adquisición preferido (mercados, supermercados, productores directos). Utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que es difícil establecer una muestra probabilística para consumidores de carne de conejo debido a su variabilidad. De los participantes fueron a 204 mayores de 18 años, individuos adultos de Salvatierra. La población encuestada consistió en 60% mujeres y 40% hombres. El 30% afirmó que en alguna ocasión ha consumido carne de conejo, la mayoría reconoce que fue de manera ocasional, la razón es porque les gusta el sabor y la gran mayoría la consumen en su casa. Los que no consumen carne de conejo es porque no la conocen o no les gusta. Se destaca que de la carne de conejo no conocen sus características de la carne de conejo, pero está interesado en conocerla y consumirla.

Palabras clave: Cunicultura, nutrición, super alimento

INTRODUCCIÓN

La producción de carne de conejo común (*Oryctolagus cuniculus*) resalta por requerir un bajo costo de inversión y manutención (Cristancho Macías, 2017). Además, son animales con una tasa reproductiva y productiva alta en comparación con otras especies, así como rendimientos en canal aproximados al 55 %, el cual depende de factores como el sexo y la edad del conejo (García-Vázquez *et al.,* 2017).

Por otro lado, la carne de conejo es considerada como una carne magra que tiene un perfil nutricional diferente al resto de carnes (Para *et al.,* 2015) , ya que contiene un 22 % de proteína con altos niveles de aminoácidos esenciales, a saber, 1,10 % de lisina, 2,12 % de treonina, 2,01 % de valina, 1,19 % de leucina, 2,88 % de isoleucina y 1,04 % de fenilalanina (Dalle Zotte y Szendrő, 2011), lo que la hace especialmente beneficiosa para mujeres embarazadas y personas de edad avanzada (Haridas *et al.,* 2022); aporta micronutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn), selenio (Se), vitamina A, vitamina B12, y ácido fólico (Simpson *et al,.* 2019); tiene un menor contenido de purinas y carece de ácido úrico (Hernández, 2007). En cuanto a las calorías presenta 140 por cada 100 gramos (Dalle, 2014), contiene una baja cantidad de grasa (de 4.6 g/100 g de carne) y grasas saturadas del 37% (Pérez, 2008).

A pesar de ser una alternativa sostenible y nutritiva, rica en proteínas y baja en grasa, el consumo de carne de conejo sigue siendo relativamente bajo en México (Vélez *et al.,* 2021). Por lo cual el objetivo de la presente investigación fue conocer la preferencia del consumo de carne de conejo en la población de Salvatierra.

METODOLOGÍA

Para estudiar el consumo de carne de conejo en la población de Salvatierra, se realizó una encuesta cualitativa y cuantitativa, mediante la herramienta Google Forms y se difundió por medios electrónicos, donde se incluye preferencias y gustos en el consumo de carne de conejo, conocimiento sobre sus beneficios nutricionales y sostenibilidad, barreras para su consumo (desconocimiento, percepción cultural, disponibilidad, formas de preparación preferidas y canal de adquisición preferido (mercados, supermercados, productores directos). Se encuestaron 342 personas pertenecientes al municipio de Salvatierra, en el mes de enero a marzo de 2025. Después de obtener los datos de la encuesta se graficó y analizó la información. Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que es difícil establecer una muestra probabilística para consumidores de carne de conejo debido a su variabilidad.

Las preguntas se relacionan con: el rango de edad, sexo del encuestado, consumo de carne, razones por las que consume carne de conejo, sitios en los que consume la carne de conejo, preparación de la carne de conejo, causas por las que no consume carne de conejo, formas en que le gustaría adquirir la carne de conejo, conocimiento nutricional de la carne de conejo.

Las consideraciones al aplicar la encuesta elaborada con Google Forms, se configuraron las siguientes reglas: los datos se utilizarán solamente con fines docentes y de investigación de mercado. Se abre el archivo en Formularios de Google mediante una liga compartida mediante vía electrónica. Si la referencia en el consumo de carnes es que no consume carne lo conducirá a la pregunta correspondiente.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

De las personas entrevistadas la mayor parte son menores a 18 años, mientras que el rango de 35 a 44 años fueron el menor número de los participantes (Figura 1). De estas personas el 71% lo representan mujeres y el 31% lo representan hombres (Figura 2).

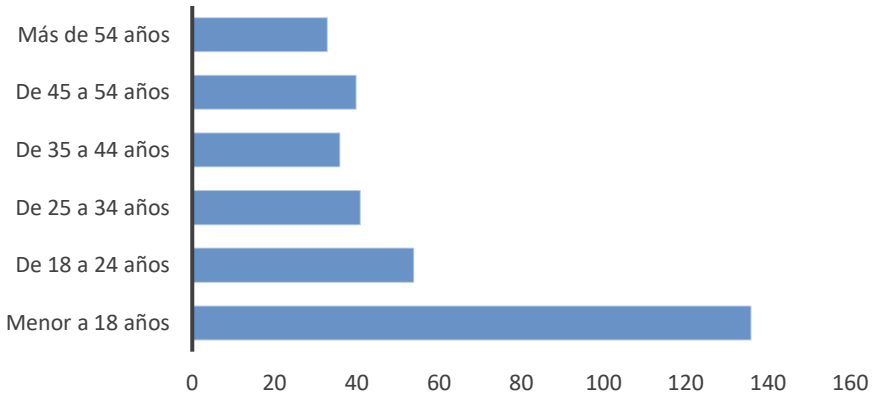


Figura 1. Rango de edad

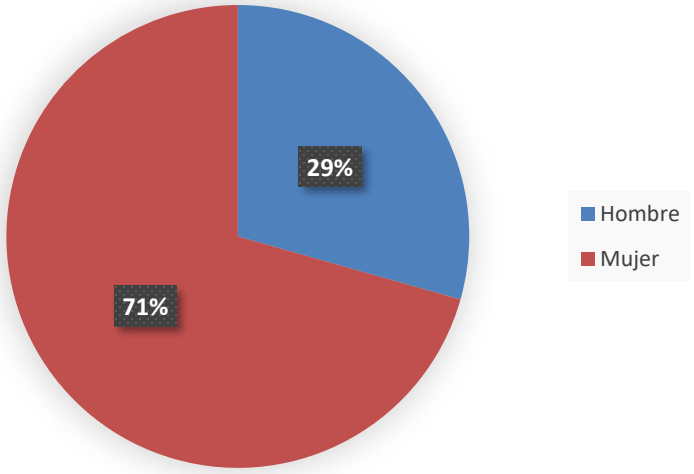


Figura 2. Sexo

El 61% de los participantes consumen carnes rojas como blancas, sin embargo, el siguiente dato más elevado (19%) no consumen de ninguna carne (Figura 3). Mientras que al consumo de carne de conejo el 76% no la ha consumido (Figura 4). Szendro *et al.,* 2020 encontraron que un fuerte predictor del consumo de carne de conejo es la actitud del consumidor, definida como el juicio positivo o negativo; esta actitud depende de las creencias y percepciones del consumidor (Sánchez - Sabaté & Sabaté, 2019). Algunas de las creencias y percepciones más importantes hacia la carne de conejo se refieren a características del producto como las características sensoriales, la salubridad, la conveniencia, la ética, el proceso de producción y el precio (Cullere & Dalle, 2018).

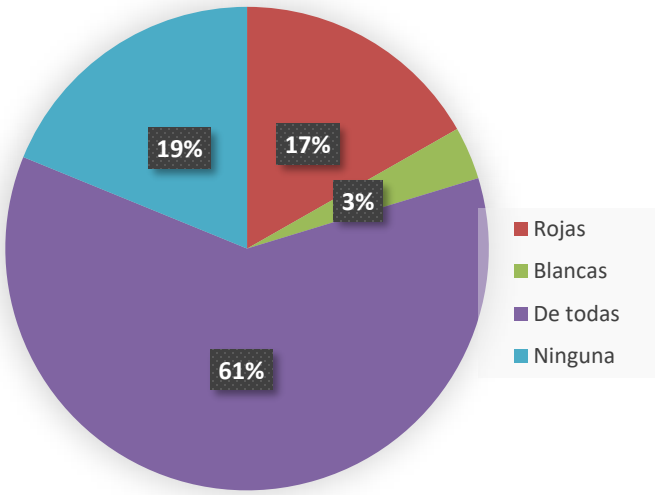


Figura 3. Consumo de carnes

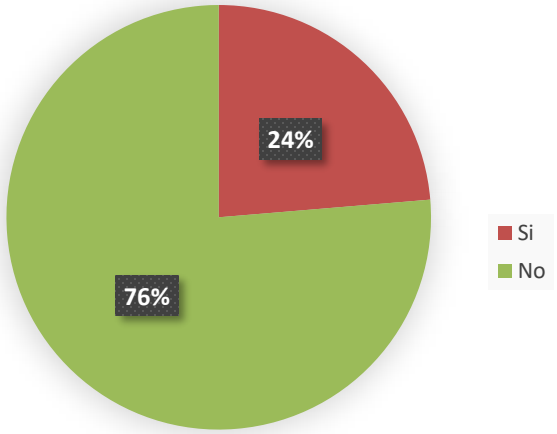


Figura 4. ¿Ha consumido carne de conejo?

En la Figura 5 se observa que la mayoría de las personas consumen la carne de conejo porque les gusta el sabor de esta, pero el 82% de las personas la consumen ocasionalmente (Figura 6). Sanah *et al.,* 2020 concuerdan en que el consumidor prefiere la carne de conejo porque consideran que su sabor es agradable; por otro lado, Dalle Zotte (2014) encontró que el segmento con mayor consumo de carne de conejo está compuesto por personas mayores de 55 años, consumidores con menor nivel educativo e ingresos, y hogares sin hijos menores de 18 años.

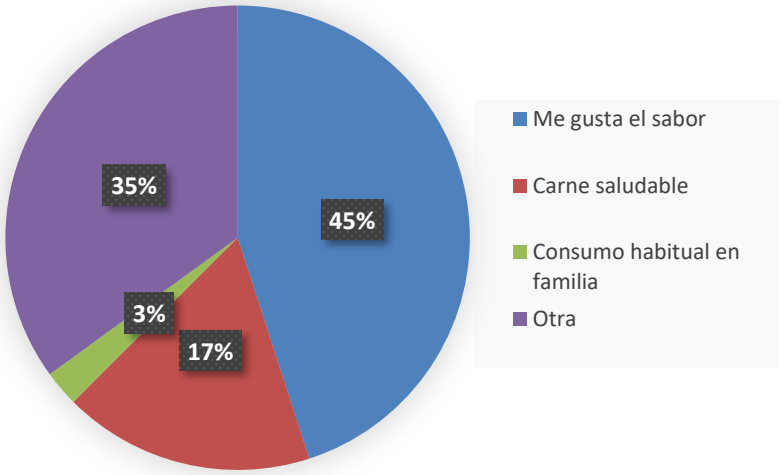


Figura 5. Razones por las que consume carne de conejo

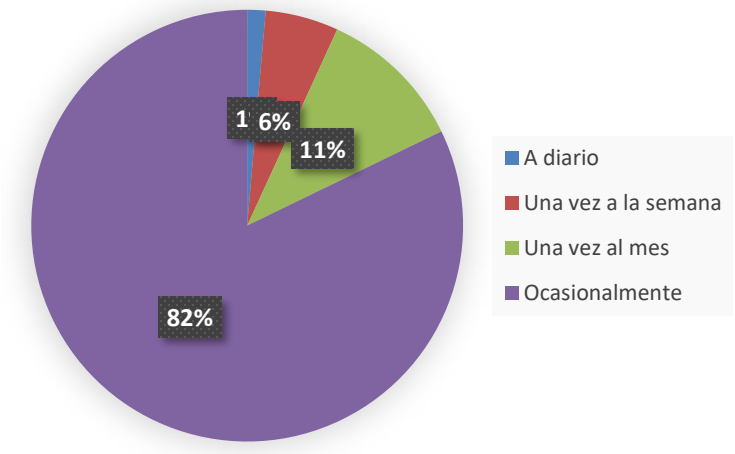


Figura 6. Frecuencia con la que consume carne de conejo

Los datos nos muestran que el 53% de las personas consumen la carne de conejo en sus casas (Figura 7); esto puede ser influenciado porque la carne de conejo generalmente se vende como una canal entera y su cocción está vinculada a recetas locales tradicionales que requieren mucho tiempo y habilidades culinarias (Baviera-Puig *et al.,* 2017). Se prefiere consumir las costillas del conejo, mientras que las manos son la parte del conejo que menos prefieren (Figura 8), ya que esta parte contiene una mayor cantidad de musculo en comparación con las demás (Pérez, 2009).

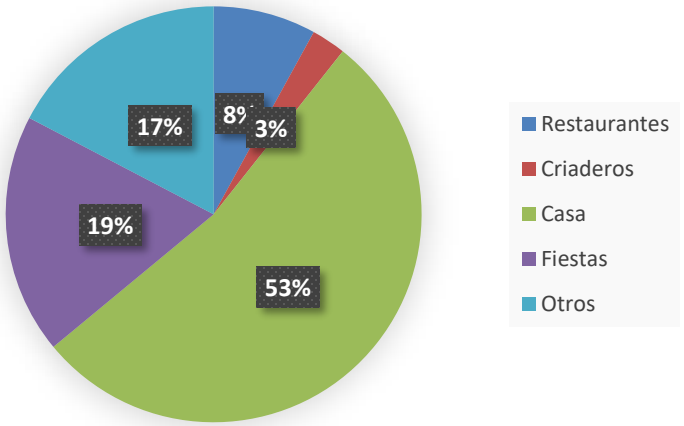


Figura 7. Sitios en donde consume la carne de conejo

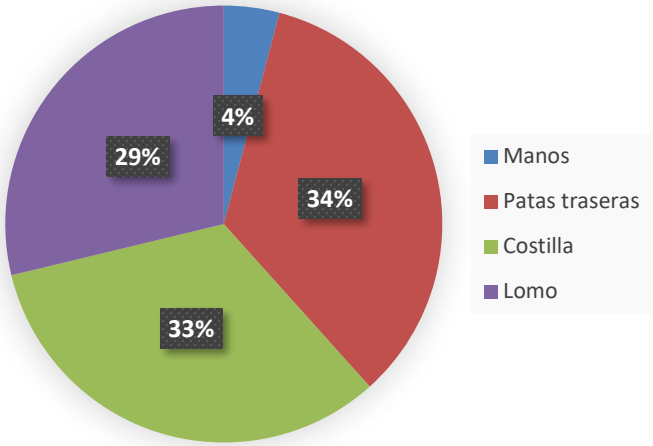


Figura 8. Parte del conejo que prefiere

Por otro lado, el 77% de los participantes no saben preparar la carne de conejo (Figura 9) y las causas por las que no la consumen es porque no la conocen representando en 37% de los encuestados, mientras que solo el 2% no la consumen porque es cara (Figura 10). Stein y Santini (2021) consideran que, es necesario mejorar las características del producto para ampliar el mercado de la carne de conejo con productos listos para comer o cocinar, elaborados según recetas tradicionales, con un sabor apetitoso incluso para los jóvenes y con menor presencia de huesos.

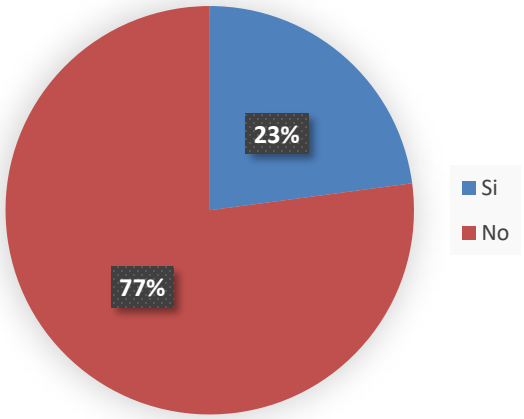


Figura 9. ¿Sabe preparar la carne de conejo?

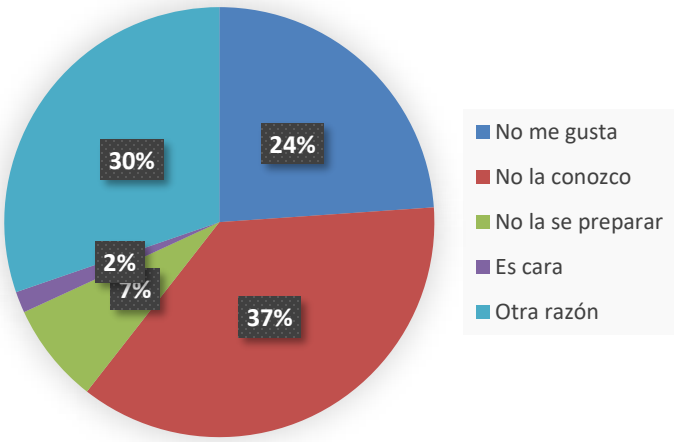


Figura 10. Causas por las que no consume la carne de conejo

En la Figura 11 se muestra que las personas están dispuestas a probar platos a base de carne de conejo representando el 60% de los encuestados, mientras que en la Figura 12 se observa que las personas consumen o consumirían el conejo asado representando el 40%.

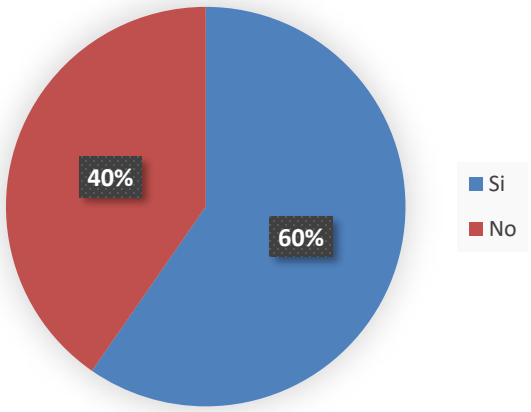


Figura 11. ¿Estaría dispuesto a probar platos a base de conejo?

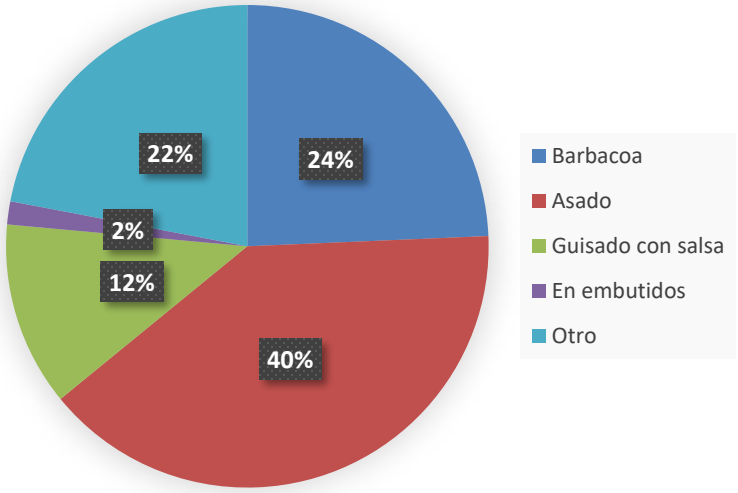


Figura 12. Presentación en la que come o comería carne de conejo

A los participantes les gustaría adquirir la carne de conejo directamente del productor (Figura 13) y no les gustaría adquirirla mediante internet, están interesados en implementarla a su dieta diaria al ser más saludable que la carne de pollo (Figura 14). Según Adanguidi (2020) los consumidores valoran el origen local de la carne por razones de calidad.

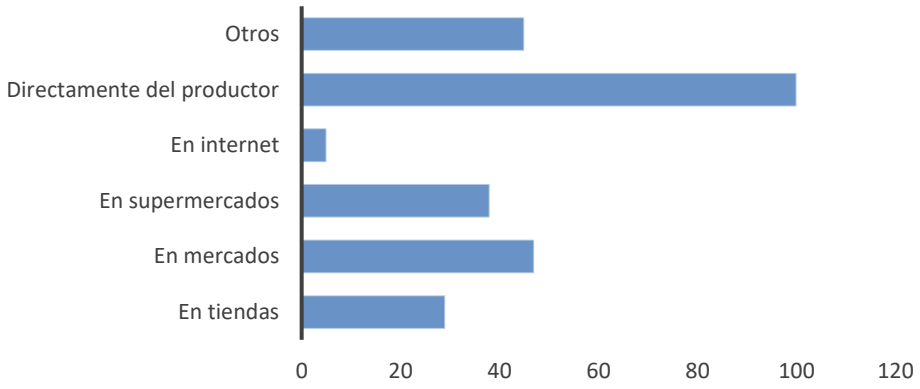


Figura 13. Formas en que le gustaría adquirir la carne de conejo

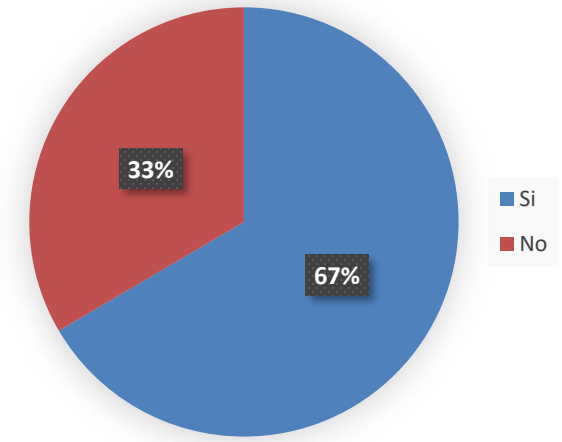


Figura 14. Si la carne de conejo es más saludable que la carne de pollo, ¿estaría dispuesto a incorporarla a su dieta diaria?

Por otro lado, los participantes no conocen el contenido nutricional de la carne de conejo ya que representa el 87% (Figura 15), pero están dispuestas a informarse mediante las redes sociales (Figura 16). Esto concuerda con Szendrő (2016) quien encontró que los consumidores consideraban que la carne de conejo es saludable debido a su alto contenido de proteína, su menor contenido de grasa y colesterol que otras carnes. Sin embargo, un alto porcentaje de consumidores (42,3%) afirmó que desconocía los beneficios para la salud. En este sentido, los consumidores indicaron que les gustaría saber más sobre los aspectos nutricionales y funcionales de la carne de conejo. Por otro lado, Siddiqui *et al.,* (2023) consideran que una estrategia eficaz para difundir información sobre la carne de conejo y llegar a los consumidores, especialmente a los más jóvenes, podría ser la venta de canales en línea espacial mente en las redes sociales.

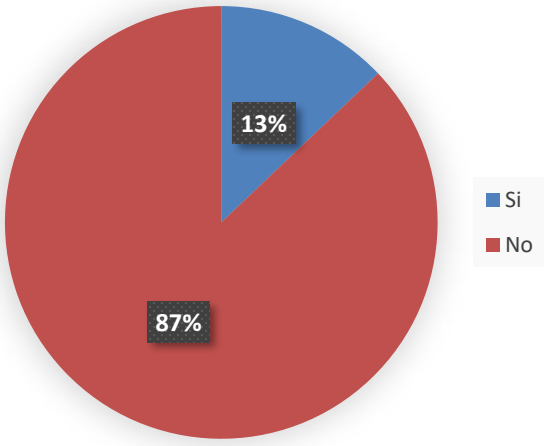


Figura 15. ¿Conoce del contenido nutricional y los beneficios de la carne de conejo?

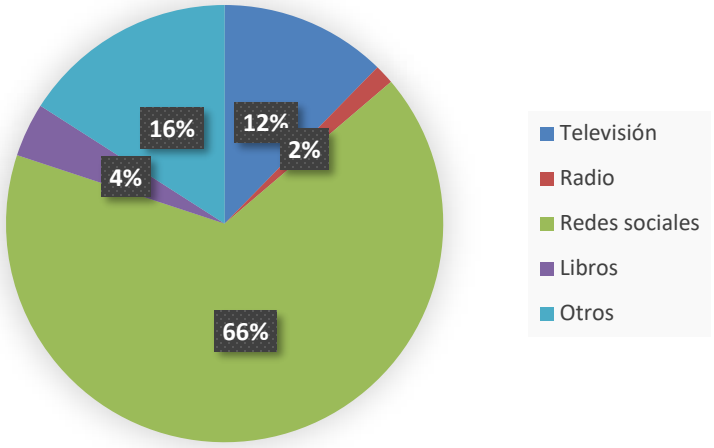


Figura 16. Medio por el cual le gustaría informarse acerca de la carne de conejo

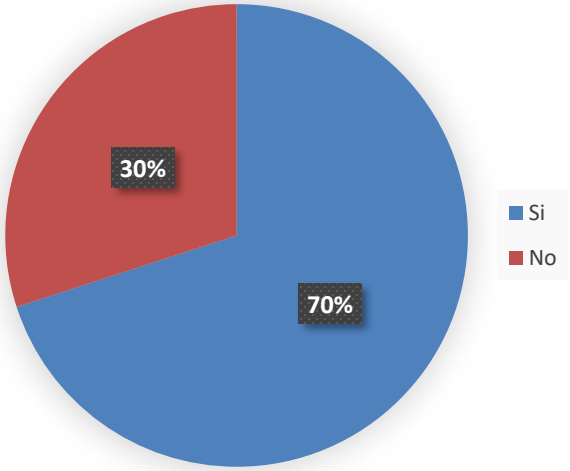


Figura 17. ¿Aceptaría la venta de carne de conejo?

En la Figura 17 observamos que el 70% aceptarían la venta de carne de conejo. En una encuesta realizada por Szendrő (2016) se encontró que los consumidores indicaron que les gustaría saber más sobre los aspectos nutricionales y funcionales de la carne de conejo y están dispuestos a la compra y consumo de esta carne.

CONCLUSIÓN

La percepción cultural de la carne de conejo y el desconocimiento sobre sus beneficios nutricionales representan obstáculos significativos para su adopción generalizada.

Se destaca el desconocimiento de las características de características de la carne de conejo, sin embargo, hay interés en conocerla y consumirla

Es importante implementar estrategias educativas y de promoción para aumentar su aceptación, destacando sus ventajas nutricionales y sostenibles.

REFERENCIAS

Para, P.A., Ganguly, S., Wakchaure, R., Sharma, R., Mahajan, T., Praveen, P.K. (2015). Rabbit Meat has the Potential of Being a Possible Alternative to Other Meats as a Protein Source: A Brief Review. Inter. Journal of Pharmacological and Biomedical Research. 2:17-19.

Siddiqui, S. A., Gerini, F., Ikram, A., Saeed, F., Feng, X., & Chen, Y. (2023). Rabbit Meat—Production, Consumption and Consumers' Attitudes and Behavior. *Sustainability*, *15*(3), 2008.

Szendrő, K. (2016) Consumer Perceptions, Concerns, and Purchasing Practices of Rabbit Meat in Hungary. *J. Food Prod. Mark. 22*, 683–693.

Adanguidi, J. (2020) Analysis of Consumer Demand and Preference for Rabbit Meat in Benin. *Int. J. Mark. Stud. 12*, 14.

Hernández, P. (2007). Carne de conejo, ideal para dietas bajas en ácido úrico. Cunicultura, 32(190).

Vélez I. A., Espinosa G. JA & Aguilar R. F. (2021). Type and characterization of rabbit farmers in Mexico's central states. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 12(2), 469-486. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i2.5811.

Dalle Z. A. & Szendrő, Z. (2011). "The role of rabbit meat as functional food: Promotion and marketing strategies." Meat Science, 88(3), 319-331. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.02.017.

Sanah, I.; Becila, S.; Djeghim, F.; Boudjellal, A. (2020) Rabbit Meat in the East of Algeria: Motivation and Obstacles to Consumption. *World Rabbit Sci. 28*, 221–237.

Cristancho Macías, L. A. (2017). Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de la carne de conejo en el municipio de Nosa-Boyacá [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Dalle Z. A. (2014). Rabbit meat: Nutritional and functional properties. Meat Science, 98(3), 392-403.

Pérez J. F. (2008) Dietas hipocolesterolemiantes, ¿para quién? Carne de conejo: equilibrio y salud. Suplemento de Nutrición No. 10. Cunicultura 33.

Baviera-Puig, A.; Buitrago-Vera, J.; Escriba-Perez, C. (2017) Montero-Vicente, L. Rabbit Meat Sector Value Chain. *World Rabbit Sci. 25*, 95–108.

Pérez A. ML Morón F. O., Gallardo, N., Vila, V., Arzalluz F. AM, y Pietrosemoli, S. (2009). Caracterización anatómica y física de los músculos del conejo. Revista Científica, 19(2), 134-138.

Stein, A.J. & Santini, F. (2021) The Sustainability of "Local" Food: A Review for Policy-Makers. *Rev. Agric. Food Environ. Stud. 103*, 77–89.

García-Vázquez, L., Ayala-Martínez, M., Zepeda-Bastida, A., Ojeda-Ramírez, D., & Soto-Simental, S. (2017). Evaluación de parámetros productivos y rendimiento de la canal de conejos que consumieron infusión de epazote (*Chenopodium ambrosioides*). Abanico Veterinario, 7(1), 44–47.

Simpson EJ, Clark M, Razak AA, Salter A. (2019). The impact of reduced red and processed meat consumption on cardiovascular risk factors; An intervention trial in healthy volunteers. Food Funct. 2019;10:6690-8.

Dalle Zotte, A. (2014) Rabbit Farming for Meat Purposes. *Anim. Front. 4*, 62–67.

Haridas, S., Ramaswamy, J., Natarajan, T., Nedungadi, P. (2022). Micronutrient interventions among vulnerable population over a de-cade: A systematic review on Indian perspective. Health Promotion Perspectives, 12 (2), 151–162.

Szendro, K.; Szabó-Szentgróti, E.; Szigeti, O. (2020) Consumers' Attitude to Consumption of Rabbit Meat in Eight Countries Depending on the Production Method and Its Purchase Form. Foods, 9, 654.

Sanchez-Sabate, R. & Sabaté, J. (2019) Consumer Attitudes towards Environmental Concerns of Meat Consumption: A Systematic Review. Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 1220.

Cullere, M.; Dalle Zotte, A. (2018) Rabbit Meat Production and Consumption: State of Knowledge and Future Perspectives. *Meat Sci. 143*, 137–146.

ELICITACIÓN QUÍMICA DE FRIJOL COMÚN (*Phaseolus Vulgaris* L.) VAR. PINTO SALTILLO) PARA LA INDUCCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DURANTE LA FORMACIÓN Y LLENADO DE VAINAS

Joel de Jesús Barba-Franco[1, 4], Miguel Ángel Ramos López[2], Sofía Loza-Cornejo[1], Jorge Alberto Acosta Gallegos[3], Xochitl Aparicio-Fernández[1] y Rosalía Reynoso-Camacho[2]

[1]Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, Enrique Díaz de León 1144, 47463, Lagos de Moreno, Jalisco, México., [2]Departamento de Investigación y Posgrado de Alimentos, Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, C.U., Cerro de las campanas S/N, Querétaro 76010, México., [3]Campo Experimental Bajío (CEBAJ-INIFAP), Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km. 6.5, Guanajuato 38010, México. [4]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas, Avenida José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México.
joel.barba7616@alumnos.udg.mx

RESUMEN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) contiene fitoquímicos como los polifenoles, que desempeñan un papel fundamental en la salud humana debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas. En este contexto, la elicitación química, con compuestos como ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio, se ha propuesto como una estrategia efectiva para inducir la biosíntesis de metabolitos secundarios, particularmente de compuestos fenólicos[1], con el fin de mejorar las propiedades funcionales del grano. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la elicitación con ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio sobre la acumulación de compuestos fenólicos en frijol pinto Saltillo. Se aplicaron de manera foliar soluciones de ácido salicílico 1.0 y 3.0 mM, quitosano 1.0 y 5.0 µM, y cloruro de calcio 0.5 y 1.0 % en plantas cultivadas en invernadero bajo temperaturas de 34 °C durante el día y 16 °C en la noche. Se realizó una aplicación única del elicitor correspondiente, en la etapa fenológica de formación de vainas (R7) y en la etapa de llenado de vainas (R8), respectivamente. La cosecha se llevó a cabo en la madurez agronómica del grano.

Para la caracterización química, los granos molidos fueron analizados mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), identificando bandas características en 3290 cm^{-1} (vibraciones de estiramiento O-H y N-H), que evidencian la presencia de grupos hidroxilo y aminas asociadas a proteínas. Los picos en 2920 y 2857 cm^{-1} corresponden a estiramientos C-H de cadenas alifáticas, mientras que la señal en 1750 cm^{-1} fue atribuida a grupos carbonilo (C=O). Además, las bandas en 1445, 1398 y 1243 cm^{-1} sugieren la presencia de estructuras aromáticas y enlaces C-O, relacionados con la presencia de compuestos fenólicos en respuesta al estrés. El análisis cuantitativo de los polifenoles extraíbles y ligados, se llevó a cabo mediante cromatografía líquida de alta resolución con detección por arreglo de diodos (HPLC-PDA) y reveló la acumulación diferencial de compuestos fenólicos. Se determinaron concentraciones de 33 y 31 µg/g de compuestos fenólicos extraíbles y 16.5 y 15 9 µg/g de compuestos fenólicos ligados elicitados en las etapas, R7 y R8, respectivamente. En particular, el tratamiento con ácido salicílico 1 mM incrementó la concentración de compuestos fenólicos extraíbles en un 92% al aplicarlo en R7 y en 23% cuando se aplicó en R8, mientras que la aplicación de quitosano 5 µM, en R7 y R8, generó aumentos del 117% y 78% en compuestos fenólicos extraíbles, respectivamente. Además, ambos tratamientos incrementaron en un 40 % la acumulación de compuestos fenólicos ligados en R8. Estos resultados demuestran que la aplicación de elicitores químicos, como ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio, promueve la acumulación de compuestos fenólicos en frijol pinto Saltillo. Este hallazgo es relevante para estrategias de manejo agronómico orientadas a mejorar la calidad fitoquímica ante condiciones de estrés abiótico.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo clave en América Central, México y el Caribe, debido a su elevada concentración de nutrientes, especialmente proteínas con aminoácidos esenciales, siendo esta leguminosa un componente fundamental de la dieta en estas regiones. Sin embargo, su producción se ve obstaculizada por diversos factores, tales como la baja fertilidad de los suelos y las condiciones climáticas adversas, como sequías o temperaturas extremas, que afectan negativamente el crecimiento de las plantas y, por ende, la rentabilidad del cultivo (CEDRSSA, 2020).

Esta situación incrementa los costos de producción y reduce el rendimiento, lo que representa un desafío significativo para los agricultores (Campos-Vega *et al*., 2010). Para mitigar estos efectos, es crucial implementar un manejo adecuado del suelo, evaluando su fertilidad y optimizando el uso de recursos, además de reducir la dependencia de insumos sintéticos mediante el uso de prácticas sostenibles. El frijol común no solo es una fuente importante de proteínas, sino que también es rico en compuestos fitoquímicos, como los compuestos fenólicos, que desempeñan un papel crucial tanto en la protección de la planta contra el estrés oxidativo, como en la mejora de la salud humana (Tibebu, 2018).

Diversos estudios han demostrado que el consumo de frijol puede contribuir a la prevención de enfermedades crónicas, tales como enfermedades cardiovasculares, cáncer de colon, diabetes, hipertensión y obesidad (Castañeda *et al.*, 2010; Cruz-Bravo *et al*., 2011; Hayat et al., 2014; Jayalath *et al*., 2014; Vergara *et a*l., 2010; Reynoso *et al*., 2007). En particular, los compuestos fenólicos no solo son responsables de las propiedades antioxidantes del frijol, sino que también tienen la capacidad de reforzar la defensa de la planta contra factores ambientales adversos, como la sequía y la exposición a patógenos (Hayat *et al*., 2014).

Para potenciar estos beneficios, una estrategia prometedora es incrementar el contenido de compuestos fenólicos en el frijol, lo cual puede lograrse mediante el uso de elicitores. La elicitación química, que incluye el uso de compuestos como el quitosano, el ácido salicílico y el cloruro de calcio, ha emergido como una herramienta biotecnológica eficaz para mejorar tanto la calidad nutricional del grano como la resiliencia de las plantas frente a condiciones de estrés (Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011). Estos elicitores estimulan la biosíntesis de metabolitos secundarios, particularmente compuestos fenólicos, mejorando así la respuesta de las plantas ante situaciones adversas. La aplicación de estos compuestos no solo promueve una mayor acumulación de antioxidantes, sino que también contribuye a una producción agrícola más sostenible y de mayor calidad nutricional (Ulloa *et al*., 2011). Sin embargo, para lograr los mejores resultados, es esencial determinar las concentraciones adecuadas de los elicitores y las etapas fenológicas óptimas para su aplicación.

Este estudio tiene como objetivo profundizar en el conocimiento sobre los efectos de los elicitores químicos en *Phaseolus vulgaris* L., evaluando la influencia del quitosano, el ácido salicílico y el cloruro de calcio en el perfil de compuestos fenólicos en la variedad frijol pinto, durante las etapas fenológicas de formación y llenado de vainas ya que durante estas etapas ocurre una intensa actividad metabólica primaria con producción de azúcares y aminoácidos clave para el desarrollo floral. Al mismo tiempo, se activan rutas del metabolismo secundario, como la de flavonoides, que apoyan la defensa y atracción de polinizadores. A través de este enfoque, se busca proporcionar información clave que pueda contribuir a la mejora de las prácticas agrícolas y al incremento de la calidad nutricional del frijol común, favoreciendo su producción en condiciones más sostenibles.

TEORÍA

En México, las principales variedades comerciales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas incluyen el frijol pinto, negro, blanco, rojo y bayo. De acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2025), el frijol pinto es la variedad más sembrada, representando cerca del 60 %

de la superficie total destinada al cultivo de frijol en el país. (Nadeem *et al*., 2021). Elcultivo de frilolse concentra principalmente en los estados de Zacatecas, Durango, Chihuahua y Guanajuato (CEDRSSA, 2020; SIAP, 2025), donde es apreciada no solo por su sabor, sino también por su capacidad de adaptación a diversas condiciones agroclimáticas y su alto rendimiento.

El frijol pinto se distingue por sus granos de tamaño mediano, forma ovalada y color marrón claro con manchas beige o blancas. Estas características físicas, junto con su sabor suave y textura cremosa, lo hacen especialmente valorado en la preparación de platillos tradicionales en México y Estados Unidos. Además, su alto contenido de proteínas, fibra dietética, compuestos fenólicos y micronutrientes lo posicionan como un alimento con potenciales beneficios para la salud humana (Campos-Vega *et al*., 2010; Ulloa *et al*., 2011).

Por otro lado, durante formación y llenado de vainas en *Phaseolus vulgaris*, el metabolismo de compuestos fenólicos es fundamental para regular el desarrollo y la protección del fruto. Estos compuestos, sintetizados principalmente a través de la vía fenilpropanoide, fortalecen las paredes celulares mediante la producción de lignina y otros polímeros fenólicos, otorgando rigidez y soporte estructural a las vainas en desarrollo. Durante estas etapas, la actividad de enzimas clave como la fenilalanina amonio-liasa (PAL) aumenta, promoviendo la biosíntesis de flavonoides y ácidos fenólicos, que además influyen en la señalización hormonal relacionada con el crecimiento y la maduración del fruto (Dixon & Paiva, 1995).

Cabe destacar, que los compuestos fenólicos son fundamentales para la calidad nutricional del frijol común y su capacidad de respuesta a factores ambientales. Por lo tanto, incrementar elcontenido de compuestos fenólicoapodría resultar en granos con mayor resistencia al estrés ambiental y un mayor valor nutricional, así como en un aporte significativo a sus propiedades funcionales. En este contexto, técnicas como el uso de elicitores como ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio pueden mejorar tanto el valor nutricional del cultivo como la resiliencia de las plantas frente a condiciones adversas.

Ácido salicílico como elicitor

El ácido salicílico es una hormona vegetal fundamental en la regulación de diversas etapas del crecimiento y desarrollo de las plantas. Su síntesis ocurre a través de dos vías principales: la vía de la fenilalanina y la vía del isocorismato. En el citosol, la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL) convierte la L-fenilalanina en ácido cinámico, el cual posteriormente es transformado en ácido salicílico (Dempsey *et al*., 2011). Este compuesto desempeña un papel central en la biosíntesis de compuestos fenólicos, que incluyen flavonoides, ligninas y ácidos fenólicos, los cuales contribuyen a la defensa y adaptación de las plantas frente a condiciones adversas (Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011). El ácido salicílico aplicado a frijol indujo la acumulación de fitoalexinas en cotiledones de frijol común, especialmente en cultivares resistentes a la antracnosis. Las concentraciones efectivas (3.62-14.50 mM) también mostraron actividad antifúngica contra *Colletotrichum lindemuthianum*, sugiriendo su utilidad como elicitor de defensa (Durango *et al*., 2013).

Quitosano como elicitor

Por otro lado, el quitosano, derivado de la quitina, es un prometedor elicitor agrícola que activa las defensas de las plantas. Al aplicarlo, las plantas muestran resistencia mejorada a plagas y patógenos. Biodegradable y no tóxico, ofrece una alternativa sostenible (Malerba & Cerana, 2016). Su aplicación estimula la biosíntesis de compuestos fenólicos, debido a que activa la vía fenilpropanoide, aumentando la actividad de la fenilalanina amonio-liasa (PAL), una enzima clave en la biosíntesis de compuestos fenólicos como ácidos fenólicos, flavonoides y lignina, lo cual potencia las propiedades antioxidantes y antimicrobianas en cultivos como el frijol común (Stasińska-Jakubas & Hawrylak-Nowak, 2022).

De acuerdo con Abdel-Aziz *et al*. (2017), el tratamiento con nanopartículas de quitosano en frijol bajo estrés salino aumentó la actividad de enzimas antioxidantes como catalasa y prolinasa, que ayudan a eliminar el daño oxidativo. Además, estimuló la síntesis de compuestos fenólicos al activar la vía fenilpropanoide, fortaleciendo las defensas naturales de la planta contra el estrés.

Cloruro de calcio como elicitor

El cloruro de calcio ($CaCl_2$) actúa como un elicitor eficaz en plantas, promoviendo la acumulación de compuestos fenólicos y mejorando la resistencia al estrés abiótico. Su aplicación foliar ha demostrado incrementar la actividad de enzimas antioxidantes y la expresión de genes relacionados con la defensa, como PAL y POD, en especies como tomate y rosa (Al-Gendy *et al*., 2016; Ruiz-García & Gómez-Plaza, 2013). Adicional a ello, la aplicación de $CaCl_2$ en otras especies vegetales ha demostrado inducir la expresión de genes relacionados con la defensa, como PAL y POD, y aumentar la actividad de enzimas antioxidantes, lo que sugiere que dicho compuesto puede tener efectos similares en el frijol común (Ma *et al*., 2019).

En este sentido, elicitores como el quitosano, el ácido salicílico y el cloruro de calcio han demostrado su capacidad para estimular la biosíntesis de compuestos fenólicos, lo que favorece una producción más sostenible y de mayor calidad nutricional. Sin embargo, es esencial evaluar su efecto específicamente en *Phaseolus vulgaris* L. Para maximizar su eficacia, resulta crucial determinar las concentraciones óptimas y las etapas fenológicas más adecuadas para su aplicación.

PARTE EXPERIMENTAL

Para poder llevar a cabo el desarrollo del proyecto se abordó la estrategia presentada en la Figura 1.

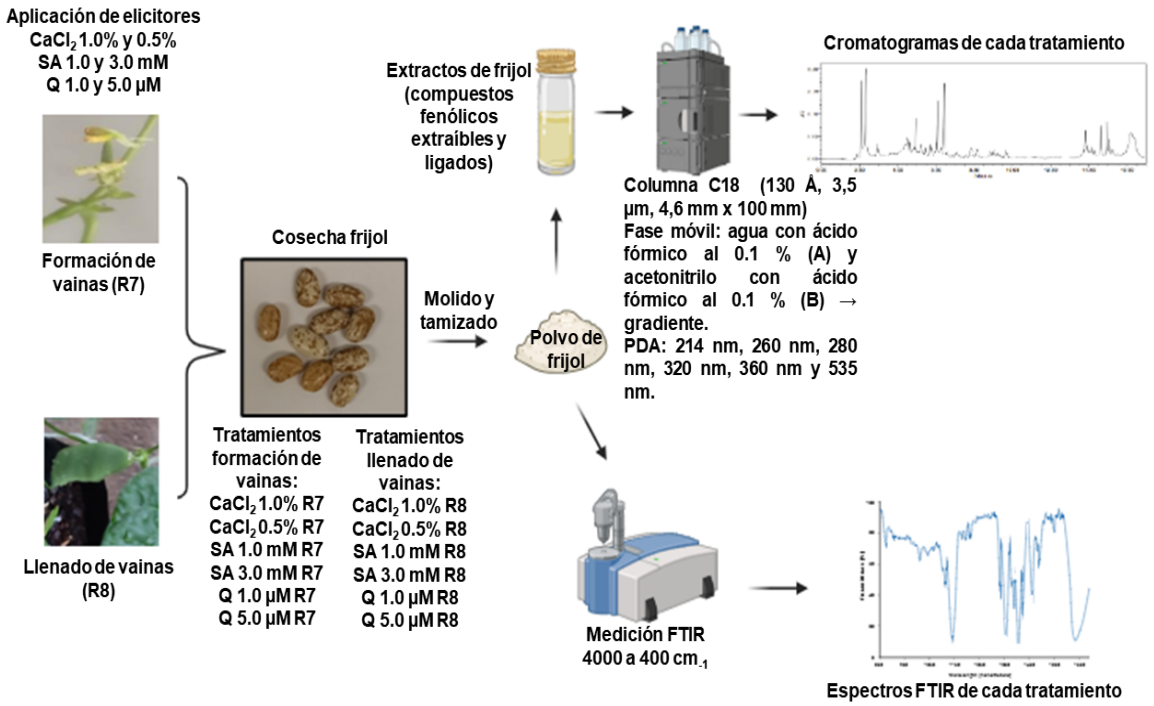


Figura 1. Diagrama experimental para el desarrollo de este proyecto.

Semillas de frijol y caracterización de crecimiento

Las semillas de frijol variedad Pinto Saltillo fueron proporcionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y se seleccionaron por su adaptación a condiciones cálidas y su amplio uso en sistemas de producción del norte y centro de México.

Diseño experimental de la elicitación del frijol pinto saltillo con ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio

La siembra se realizó en bolsas de plástico con dimensiones de 20 x 40 cm, con tres perforaciones en la parte inferior para asegurar un adecuado drenaje. Las bolsas fueron llenadas con una mezcla de fibra de coco y tierra para macetas y se sembraron dos semillas de frijol pinto en cada una. El riego se llevó a cabo diariamente, y la fertilización del sustrato se realizó de forma granular en dos aplicaciones: la primera consistió en 3.5 g de fertilizante INDICAR QUE COMPUESTOS SON18-44-00 durante la formación de las primeras hojas trifoliadas, y la segunda en 1.3 g de fertilizante 46-00-00 en la etapa de prefloración. El desarrollo experimental se llevó a cabo en el invernadero del Centro Universitario de los Lagos, donde se mantuvieron temperaturas de 34 °C durante el día y 16 °C durante la noche, con un 40 % de humedad relativa.

Con el objetivo de evaluar el impacto de la elicitación química mediante ácido salicílico, quitosano y cloruro de calcio sobre el frijol pinto, se diseñó un experimento con tres factores (elicitor, concentración del elicitor y etapa de elicitación) y múltiples niveles, utilizando el software Minitab versión 18.1. Se elicitaron un total de doce plantas por tratamiento con 200 mL de ácido salicílico (AS) a concentraciones de 1.0 y 3 mM, quitosano (Q) a 1 y 5 µM, y cloruro de calcio (Ca) al 0.5 y 1.0 % al inicio de cada etapa fenológica considerada. En total, se evaluaron dos etapas fenológicas: la formación de vaina y el llenado de vaina (R7 y R8), y los experimentos correspondientes a cada etapa se llevaron a cabo de manera independiente. Al llegar a la madurez los granos fueron cosechados, molidos en una licuadora y tamizados a 300 µm. Los polvos se guardaron a 4 °C hasta la realización de los extractos o su caracterización correspondiente.

Caracterización por espectroscopia FTIR del frijol elicitado

El análisis FTIR-ATR del polvo de frijol se llevó a cabo utilizando un espectrómetro PerkinElmer FT-IR/FIR, en el rango de 400 a 4000 cm^{-1}. Los espectros obtenidos fueron procesados y representados gráficamente con el software Origin Pro 9. Este procedimiento permitió la identificación de los compuestos presentes en el polvo de frijol a través de sus características vibracionales.

Caracterización del perfil fenólico por UPLC-PDA de los extractos de frijol elicitado

Se pesaron 0.2 g de frijol y se extrajeron con 1 mL de una mezcla metanol: agua (1:1, v/v) ajustada a pH neutro, agitando la mezcla durante 1 hora. Posteriormente, se centrifugó a 5000 rpm durante 5 minutos y se recuperó el sobrenadante 1. Al precipitado restante se le añadió una mezcla agua: acetona (1:1, v/v), se agitó durante una hora y se centrifugó nuevamente a 5000 rpm por 5 minutos. Se recuperó el sobrenadante dos y ambos sobrenadantes se combinaron para caracterizar el perfil de compuestos fenólicos extraíbles. Adicionalmente, el precipitado residual fue tratado con 10 mL de NaOH 2 M y sometido a un tratamiento térmico durante 30 minutos a 95 °C, seguido de una agitación de una hora. La mezcla alcalina fue neutralizada con 2 mL de HCl concentrado. Finalmente, se realizaron cinco lavados consecutivos con 10 mL de acetato de etilo y la fracción resultante se utilizó para cuantificar los compuestos fenólicos ligados.

Las fracciones de compuestos fenólicos extraíbles y ligados se concentraron a vacío (Speedvac, Thermo Fisher Scientific) durante 12 h a 0.12 bar y 45 ºC. Después fueron resuspendidos en 200 µL de metanol de grado HPLC y filtrados (0.45 µm). La separación cromatográfica se llevó a cabo utilizando un equipo de cromatografía líquida (Acquity Arc, Waters Corp). Se utilizó una columna C18X Bridge BEH Shield RP18 (130 Å, 3,5 µm, 4,6 mm x 100 mm) (Waters Corp) a 30 °C en la que

se inyectaron 2 µL de cada muestra. La fase móvil consistió en agua con ácido fórmico al 0.1 % (A) y acetonitrilo con ácido fórmico al 0.1 % (B) a un caudal de 0.5 ml/min. Las condiciones del gradiente fueron las siguientes: 15 % de B a los 2.5 min, 21 % de B a los 10 min, 90 % de B a los 12 min, 95 % de B a los 13 min y, finalmente, 0 % de B a los 15 min durante 2 min.

La identificación de los compuestos se realizó mediante curvas de calibración con ácido gálico, ácido elágico (ácidos hidroxibenzoicos), quercetina, catequina hidratada, epicatequina, galato de epicatequina (flavonoides), cloruro de malvidina (antocianinas) y naringina (flavanona), así como los metabolitos ácido 3,4-hidroxifenilpropiónico, ácido 3,4-dihidroxifenilacético, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido 3,4-dihidroxibenzoico y el ácido 3-hidroxibenzoico. El detector de matriz de diodos se ajustó a una adquisición a 214 nm, 260 nm, 280 nm, 320 nm, 360 nm y 535 nm. Los resultados se analizaron utilizando el software Empower (Waters Corp.) y se expresaron en µg/g de muestra. Todos los reactivos utilizados como fase móvil y estándares fueron de grado HPLC (Castilla-Ramírez *et al*., 2024).

Análisis estadístico

Cada análisis se realizó por triplicado y los resultados se expresaron con la media estadística y su respectiva desviación estándar. Los datos obtenidos en HPLC se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y las muestras diferentes estadísticamente se determinaron mediante la prueba de Tukey ($p< 0.05$) usando un software estadístico Minitab versión 18.1.

RESULTADOS

Caracterización del crecimiento de frijol y ciclos fenológicos

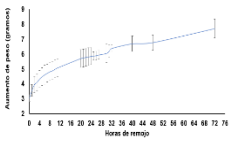
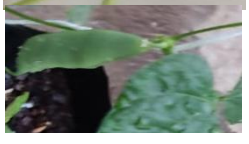
El ciclo fenológico del frijol pinto fue caracterizado en condiciones de invernadero, con una duración total de 108 días desde la germinación hasta la madurez agronómica, momento en el que se realizó la recolección de los granos. Las etapas vegetativas tuvieron una duración promedio de 50 días, mientras que la fase reproductiva se extendió aproximadamente 60 días hasta la cosecha.

Las etapas fenológicas de interés en este estudio se observaron a los 72 y 83 días después de la siembra, correspondientes a la formación (R7) y llenado de vainas (R8), respectivamente (Tabla 1). Estas observaciones sugieren un ciclo de producción más prolongado para el frijol pinto, posiblemente influenciado por las condiciones climáticas registradas durante los ciclos primavera-verano de 2022 y 2023. En ese periodo, las temperaturas diurnas alcanzaron los 34 °C, mientras que las nocturnas apenas descendieron a 18 °C, lo que generó estrés térmico en las plantas.

Este fenómeno podría haber afectado negativamente el desarrollo del cultivo, ya que diversos estudios reportan que la temperatura óptima para el crecimiento del frijol se encuentra entre los 20 y 25 °C. Temperaturas fuera de este rango pueden interferir con procesos fisiológicos clave, especialmente durante etapas críticas como la floración y la formación de vainas, impactando directamente en el rendimiento del cultivo (Jiménez-Galindo y Acosta-Gallegos, 2018). Además, el estrés térmico puede alterar el equilibrio hormonal, reducir la eficiencia fotosintética y provocar una mayor senescencia foliar, factores que en conjunto limitan el potencial productivo.

En consecuencia, el monitoreo ambiental y el manejo oportuno del cultivo bajo condiciones de estrés se vuelven fundamentales para mitigar sus efectos. La identificación de genotipos tolerantes y el ajuste en la fecha de siembra podrían representar estrategias viables para enfrentar este tipo de desafíos en regiones con temperaturas crecientes.

Tabla 1. Etapas fenológicas detectadas para el desarrollo de frijol pinto. Los resultados expresan la media ± la desviación estándar n=20.

Etapa	Nombre	Tiempo	Observación	Imagen
V0	Germinación	4.60 ± 1.50	Brote de radícula	
V1	Emergencia	7.55 ± 1.60	Cotiledones por encima de la tierra	
V2	Hojas primarias	16.95 ± 3.28	Dos hojas grandes	
V3	Primera hoja trifoliada	24.55 ± 5.70	Primeros foliolos en grupos de tres	
V4	Tercera hoja trifoliada	45.9 ± 2.47	Tercera hoja trifolada e inicio de enredadera.	
R5	Prefloración	51.6 ± 4.47	Botones florales en axilas de tallos	
R6	Floración	60.4 ± 3.67	Flores blancas	
R7	Formación de vainas	72.15 ± 5.98	Flores amarillas y emerge vaina	
R8	Llenado de vainas	83.3 ± 4.92	Abultamientos dentro de vainas	
R9	Maduración	108.00 ± 5.49	Vainas amarillas	

Caracterización por espectroscopia FTIR del frijol elicitado

Los espectros infrarrojo (IR) obtenidos de las muestras de frijol elicitado en la formación y en el llenado de vainas se observan en las Figuras 2a y 2b, respectivamente. Se revelaron diez vibraciones químicas características en el frijol pinto control y en todos los tratamientos que incluyen ácido salicílico (SA), calcio (Ca^{2+}) y quitosano (Q). Las bandas espectrales se identifican en 3283 cm^{-1}, correspondiente a grupos O–H, y en el rango de 2932 a 2887 cm^{-1}, asociado a grupos C–H alifáticos. Además, se detectan señales en 1635 y 1553 cm^{-1}, que se relacionan con enlaces C=O y N–H, los cuales son indicativos de la presencia de proteínas y flavonoides. La señal en 1445 cm^{-1} está asociada a una flexión asimétrica de CH_2, mientras que se observan dos vibraciones en 1398 y 1243 cm^{-1}, que indican la presencia de COO^- y C–N, respectivamente. Finalmente, se identifica una vibración en 1040 cm^{-1}, que puede relacionarse con la vibración del grupo funcional C–O, y en la región de 1000 a 500 cm^{-1} se presenta un patrón similar que se asocia con la matriz vegetal característica del frijol pinto.

Las vibraciones observadas en los espectros FTIR sugieren la presencia de carbohidratos, como el almidón, y compuestos fenólicos con funciones estructurales y antioxidantes, evidenciados por la banda ubicada a 3283 cm^{-1}, asociada al grupo funcional –OH. Además, las señales correspondientes a los grupos CH_2 y C–H indican la presencia de lípidos, ceras y terpenoides, componentes esenciales de las membranas celulares y con un papel clave en los mecanismos de defensa (tabla 2).

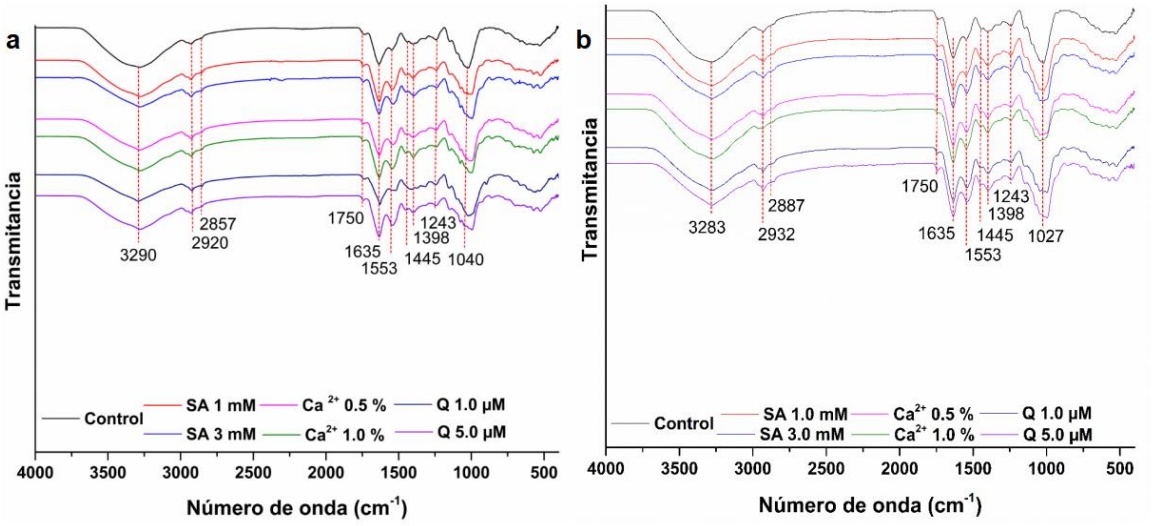


Figura 2. FTIR-ATR de frijol pinto (*Phaseolus vulgaris* L.), elicitado con ácido salicílico (1 y 3 mM), $CaCl_2$ (0.5 y 1.0%) y quitosano (1 y 5 µM) durante las etapas reproductivas de **(a)** formación de vaina "R7" y **(b)** llenado de vainas "R8".

La señal asociada al grupo carbonilo (C=O) sugiere la presencia de flavonoides y lípidos oxigenados, mientras que las vibraciones de los enlaces C=C y N–H indican la existencia de anillos aromáticos y proteínas, respectivamente, elementos fundamentales en el metabolismo secundario y en las reservas nitrogenadas. Además, las señales atribuibles a CH_2 y al grupo carboxilato (COO^-) refuerzan la identificación de lípidos y aminoácidos.

Estas vibraciones confirman que los granos de frijol están compuestos predominantemente por carbohidratos, proteínas, lípidos y metabolitos secundarios, todos esenciales para su desarrollo, funcionalidad biológica y valor nutricional. Los desplazamientos batocrómicos e hipsocrómicos observados en los números de onda podrían estar relacionados con variaciones en la concentración o estructura de estos compuestos.

Tabla 2. Relación de número de onda con los grupos funcionales correspondientes a la vibración observada en el FTIR-ATR del frijol pinto elicitado en distintas etapas fenológicas.

Número de onda (cm^{-1})	Grupo funcional	Metabolitos relacionados	Referencia
3283	-OH (hidroxilo)	Carbohidratos (almidón), compuestos fenólicos	Gallardo-Cabrera 2020
2932	Estiramiento asimétrico de CH_2	Biomoléculas	Carbas *et al*. 2020
2887	Tensión de C-H	Biomoléculas (lípidos y terpenoides)	Liu, s.f.
1750	Estiramiento de C=O	Lípidos, flavonoides y terpenoides	Liu, s.f.
1635	Estiramiento de C=C	Anillos aromáticos	Liu, s.f.
1553	Flexión de N-H	Amidas (proteínas)	Liu, s.f.
1445	Flexión asimétrica CH_2	Alcanos, aromáticos, lipidos y ceras	Silverstein *et al*., 2014
1398	COO^-	Proteinas	Montalvo-Paquini *et al*., 2018
1243	Estiramiento de C-N	Aminas (proteinas)	Montalvo-Paquini *et al*., 2018
1027	Estiramiento C–O	Carbohidratos	Liu, s.f.

Cuantificación del contenido total de compuestos fenólicos por UPLC-PDA de los extractos de frijol elicitado

La Figura 3 muestra el efecto de la elicitación química sobre el contenido de compuestos fenólicos extraíbles (a, c) y ligados (b, d) en frijol pinto Saltillo, con aplicaciones realizadas en las etapas R7 (formación de vainas) y R8 (llenado de vainas). En la etapa R7, el tratamiento con ácido salicílico 1 mM incrementó los compuestos fenólicos extraíbles en un 92% y Q 5.0 µM 117% respecto al control (Figura 3a). Por otro lado, los compuestos fenólicos ligados se incrementaron en un 28 % con cloruro de calcio 1.0% y un 22 % con Q 5.0 µM, en comparación con el control (Figura 3b).

En la etapa R8, los tratamientos Q 5 µM y $CaCl_2$ 1.0% provocaron el mayor efecto, con un incrementos del 78% y 75% respectivamente, en los compuestos fenólicos extraíbles frente al control, seguidos del Q 1.0 µM y SA 1.0 mM con un 29% y 23% de aumento, respectivamente (Figura 3c). Respecto a los compuestos fenólicos ligados, los tres elicitores probados estimularon su síntesis hasta un incremento del 40 %, en comparación con el control (Figura 3d). Estos resultados confirman que los elicitores aplicados, especialmente el quitosano, inducen una mayor acumulación de compuestos fenólicos, particularmente cuando se aplican durante la etapa de llenado de vainas.

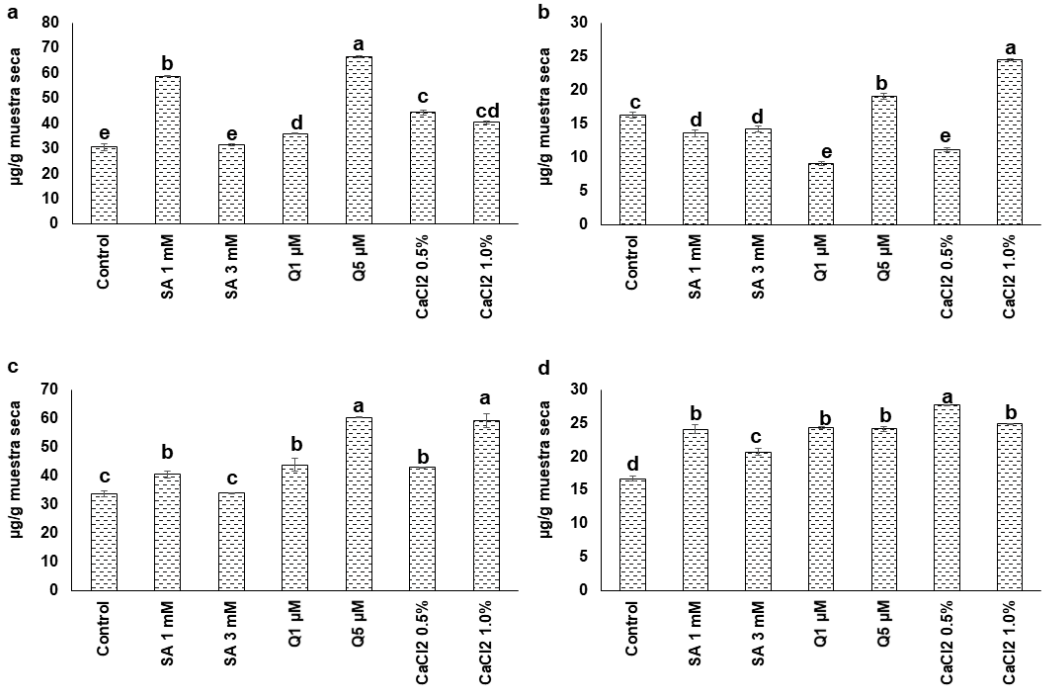


Figura 3. Contenidos totales de compuestos fenólicos extraíbles (a, c) y ligados (b, d), determinados mediante UPLC-PDA en frijol pinto (*P. vulgaris* L.), elicitado con ácido salicílico (1 y 3 mM), quitosano (1 y 5 µM) y $CaCl_2$ (0.5 y 1.0%), durante las etapas reproductivas de formación de vaina "R7" (**a**, **b**) y llenado de vaina "R8 (**c**, **d**). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La aplicación de elicitores químicos, como ácido salicílico y quitosano, promovió un aumento significativo en la acumulación de compuestos fenólicos en frijol pinto Saltillo, especialmente en la etapa R7. Los tratamientos con ácido salicílico 1.0 mM y quitosano 5.0 µM, estimularon mayormente la síntesis de compuestos fenólicos extraíbles y ligados. El análisis FTIR mostró además, las señales características como O–H, C–H, C=O, N–H, COO^- y C–O. Estos resultados indican que la elicitación química es una estrategia efectiva para mejorar la calidad fitoquímica del frijol. Este enfoque tiene implicaciones importantes para la mejora de cultivos en escenarios agrícolas adversos y para el valor nutricional del frijol.

BIBLIOGRAFÍA

1. 1.Abdel-Aziz, H. M., Hasaneen, M. N. A., & Omer, A. M. (2017). Effect of Nano Chitosan on Growth, Physiological and Biochemical Parameters of *Phaseolus vulgaris* under Salt Stress. Journal of Plant Production, 8(5), 577–585. https://doi.org/10.21608/jpp.2017.40468

2. Al-Gendy, A. A., Rabab, M. A., Hamdan, D. I., & Afaf, E. A.-G. (2016). Elicitation induced flavonoids, phenolic constituents, antioxidant and cytotoxic activities of *Artemisia monosperma* callus cultures. Journal of Medicinal Plants Research, 10(40), 717–731. https://doi.org/10.5897/JMPR2016.6248

3. Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., & Oomah, B. D. (2010). Minor components of pulses and their potential impact on human health. Food Research International, 43(2), 461–482. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.004

4. Carbas, B., Machado, N., Oppolzer, D., Ferreira, L., Brites, C., Rosa, E. A., & Barros, A. I. (2020). Comparison of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for the determination of nutritional and antinutritional parameters in common beans. Food chemistry, 306, 125509. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125509

5. Castilla-Ramírez, P., Servin Uribe, R. I., Barba-Franco, J. de J., & Reynoso-Camacho, R. (2024). Ethanol and citric acid: an efficient alternative for extracting anthocyanins and proanthocyanidins, and co-pigments associated with thermostability from Syrah grape pomace. Journal of Food Measurement and Characterization, 19(2), 1348–1361. https://doi.org/10.1007/s11694-024-03049-w

6. CEDRSSA, Centro de Desarrollo Rural y Sustentable y la Soberanía Alimentaria, (2020), Mercado del frijol situación y prospectiva. Palacio lesgislativo Lazaro Cardenas. Disponible en: http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/53Mercado%20del%20frijol.pdf

7. Cruz-Bravo, R. K., Ramos-Gómez, M., Campos-Vega, R., Guevara-González, R. G., García-Gasca, T., Oomah, B. D., & Loarca-Piña, G. (2011). Fermented nondigestible fraction from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Negro 8025 modulates HT-29 cell behavior. Journal of Food Science, 76(2), T41–T47. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.02025.x

8. Dempsey, D. A., Vlot, A. C., Wildermuth, M. C., & Klessig, D. F. (2011). Salicylic acid biosynthesis and metabolism. The Arabidopsis Book, 9, e0156. https://doi.org/10.1199/tab.0156

9. Dixon, R. A., & Paiva, N. L. (1995). Stress-induced phenylpropanoid metabolism. The Plant Cell, 7(7), 1085–1097. https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1085

10. Durango, D., Pulgarín, N., Echeverri, F., Escobar, G., & Quiñones, W. (2013). Effect of Salicylic Acid and Structurally Related Compounds in the Accumulation of Phytoalexins in Cotyledons of Common Bean (Phaseolus vulgaris L.) Cultivars. Molecules, 18(9), 10609–10628. https://doi.org/10.3390/molecules180910609

11. Hayat, I., Ahmad, A., Masood, Z., Bashir, S., & Wani, I. A. (2014). Nutritional and health perspectives of beans (*Phaseolus vulgaris* L.): An overview. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 54(5), 580–592. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.596639

12. Jayalath, V. H., de Souza, R. J., Ha, V., Mirrahimi, A., Blanco Mejia, S., Di Buono, M., Jenkins, D. J. A., Leiter, L. A., Wolever, T. M. S., Beyene, J., Kendall, C. W. C., & Sievenpiper, J. L. (2014). Effect of dietary pulses on blood pressure: A systematic review and meta-analysis of controlled feeding trials. American Journal of Hypertension, 27(1), 56–64. https://doi.org/10.1093/ajh/hpt155

13. Liu, Y. (n.d.). 6.03: IR Spectrum and Characteristic Absorption Bands. In Organic Chemistry I. LibreTexts. Retrieved from https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_I_(Liu)/06%3A_Structural_Identification_of_Organic_Compounds-_IR_and_NMR_Spectroscopy/6.03%3A_IR_Spectrum_and_Characteristic_Absorption_Bands Accesado el: 04/05/25.

14. Ma, Y., Wang, P., Zhou, T., Chen, Z., Gu, Z., & Yang, R. (2019). Role of Ca^{2+} in phenolic compound metabolism of barley (Hordeum vulgare L.) sprouts under NaCl stress. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99(11), 5043–5050. https://doi.org/10.1002/jsfa.9762

15. Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. International Journal of Molecular Sciences, 17(7), 996. https://doi.org/10.3390/ijms17070996

16. Montalvo-Paquini, C., Avila-Sosa, R., Aurelio López-Malo, A., & Palou, E. (2018) Preparation and Characterization of Proteinaceous Films from Seven Mexican Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Food Quality, Article ID 9782591, 8 pages. https://doi.org/10.1155/2018/9782591

17. Nadeem, M. A., Yeken, M. Z., Shahid, M. Q., Habyarimana, E., Yılmaz, H., Alsaleh, A., Hatipoğlu, H., Çilesiz, Y., Khawar, KM., Ludidi, N., Ercişli, S., Aasim, M., Karaköy, T., & Baloch, F. S. (2021). Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics and proteomics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *35*(1), 759-787. https://doi.org/10.1080/13102818.2021.1920462

18. Reynoso-Camacho, R., Ríos-Ugalde, M. del C., Torres-Pacheco, I., Acosta-Gallegos, J. A., Palomino-Salinas, A. C., Ramos-Gómez, M., González-Jasso, E., & Guzmán-Maldonado, S. H.

(2007). Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) consumption and its effects on colon cancer in Sprague-Dawley rats. Agricultura Técnica en México, 33(1), 43–52.

19. Rivas-San Vicente, M., & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development. Journal of Experimental Botany, 62(10), 3321-3338. https://doi.org/10.1093/jxb/err031

20. Ruiz-García, Y., & Gómez-Plaza, E. (2013). Elicitors: A Tool for Improving Fruit Phenolic Content. Agriculture, 3(1), 33–52. https://doi.org/10.3390/agriculture3010033

21. SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Gobierno de México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ Accesado el: 04/05/2025.

22. Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J., & Bryce, D. L. (2014). Spectrometric identification of organic compounds (8th ed.). John Wiley & Sons.

23. Stasińska-Jakubas, M., & Hawrylak-Nowak, B. (2022). Protective, biostimulating, and eliciting effects of chitosan and its derivatives on crop plants. Molecules, 27(9), 2801. https://doi.org/10.3390/molecules27092801

24. Ulloa, J. A., Rosas-Ulloa, P., Ramírez-Ramírez, J. C., & Ulloa-Rangel, B. E. (2011). El frijol (*Phaseolus vulgaris* L): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos, Revista Fuente, 3 (8), 5 – 9. http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/582

25. Vergara-Castañeda, H. A., Guevara-González, R. G., Ramos-Gómez, M., Reynoso-Camacho, R., Guzmán-Maldonado, H., Feregrino-Pérez, A. A., Oomah, B. D., & Loarca-Piña, G. (2010). Non-digestible fraction of cooked bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Bayo Madero suppresses colonic aberrant crypt foci in azoxymethane-induced rats. Food & Function, 1(3), 294–300. https://doi.org/10.1039/C0FO00130A

USO DE BIOFERTILIZANTES EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA (*Lactuca Sativa*): ESTUDIO COMPARATIVO

Francisca Isabel Coronado Ortiz[1], Héctor Emmanuel Valtierra Marín[1], Lucía Delgadillo Ruíz[1], Laura Elvira Valencia Adame[1], Eduardo Valdez Romero[1], Fermín Ramírez Baca[1], Marisa Mercado Reyes[1] y Claudia Herminia Maldonado Tapia1[1]

Universidad Autónoma de Zacatecas
isabe23coronado@gmail.com

RESUMEN

La lechuga (*Lactuca sativa*) es una de las hortalizas más consumidas a nivel mundial debido a sus propiedades nutricionales, entre las que destacan su alto contenido en fibra y su capacidad de hidratación. En este sentido, su producción enfrenta constantes desafíos relacionados con la sostenibilidad, la calidad del producto y la eficiencia en el uso de insumos. En el ámbito agrícola, los biofertilizantes han sido identificados como una alternativa sostenible para mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos. El objetivo del presente estudio es analizar el efecto de la aplicación de biofertilizantes (Fosfonat, Pentacil y Bactiva) en el crecimiento y rendimiento de la lechuga, comparando dos tratamientos: la dosis recomendada en la ficha técnica (Grupo 1) y una dosis doble (Grupo 2). Con lo anterior, se busca determinar si la aplicación aumentada de biofertilizantes genera mejoras significativas en parámetros de desarrollo vegetal. La metodología empleada fue un diseño experimental con dos grupos de tratamiento cada uno con diez repeticiones. Para evaluar las diferencias entre los grupos de tratamiento y determinar la influencia de los biofertilizantes en el desarrollo de la lechuga, se utilizó un modelo estadístico ANOVA, el cual permitió analizar la variabilidad de los datos y establecer si las diferencias observadas en los parámetros de estudio (peso final, diámetro de la planta y número de hojas) eran estadísticamente significativas. Al primer día después del trasplante se les aplicó el biofertilizante según la dosis correspondiente, para continuar aplicándolos dos veces por semana durante 6 semanas, las mediciones se realizaron periódicamente para registrar el desarrollo de las plantas y por último la cosecha se llevó a cabo aproximadamente 70 días después de la siembra, verificando que las cabezas de lechuga alcanzaran el tamaño y la consistencia óptimos. Los resultados muestran que, en el peso final, el Grupo 1 (dosis recomendada) obtuvo un peso final relativamente mayor que el Grupo 2 (dosis doble). Sin embargo, esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$). En cuanto al diámetro de la planta, las lechugas tratadas con la dosis recomendada mostraron un diámetro superior, con una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$). Por último, respecto al número de hojas, no se observaron diferencias significativas entre los grupos ($p > 0.05$). En conclusión, aunque la aplicación de biofertilizantes no permitió que las plantas alcanzaran los estándares de calidad establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-FF-51-1982, su uso en la producción de lechuga *Lactuca sativa* evidencia un potencial significativo como estrategia para mejorar el rendimiento del cultivo. A pesar de no cumplir con los parámetros de clasificación de primera calidad, la incorporación de biofertilizantes puede contribuir a una producción más eficiente, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles. Este enfoque representa una alternativa prometedora dentro del contexto de la agricultura sustentable, impulsando la investigación y el desarrollo de tecnologías más amigables con el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria ha incentivado la búsqueda de alternativas a los fertilizantes químicos convencionales. **L**os biofertilizantes se han consolidado como una opción más sostenible, capaz de mejorar la salud del suelo y optimizar la calidad de los cultivos. La lechuga (*Lactuca sativa*), debido a su relevancia económica y valor nutricional, constituye un cultivo de alto interés para agricultores y científicos, quienes buscan estrategias para maximizar su producción de manera eficiente y sustentable

(Martínez et al., 2012). El empleo de biofertilizantes representa una estrategia sustentable con beneficios tanto ambientales como económicos para la agricultura.

Al disminuir la dependencia de insumos químicos de alto costo, su aplicación contribuye a la reducción de los gastos de producción en el largo plazo. En este sentido, los cultivos tratados con biofertilizantes suelen ser percibidos como de mayor calidad, lo que les permite alcanzar precios más competitivos en el mercado, particularmente dentro del creciente sector de productos orgánicos. Además, su uso desempeña un papel fundamental en la mitigación del cambio climático, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la fabricación y aplicación de fertilizantes sintéticos (Estay, 1998). Estos productos biológicos aprovechan microorganismos beneficiosos para mejorar la fertilidad del suelo y fomentar el crecimiento de las plantas de manera natural. A medida que crece la preocupación por el impacto ambiental y la salud humana, el uso de biofertilizantes no solo responde a una necesidad urgente de reducir la dependencia de productos químicos sintéticos, sino que también promueve la regeneración de los ecosistemas agrícolas y contribuye a una agricultura más verde y saludable. La implementación de prácticas agrícolas más sostenibles es esencial para enfrentar los desafíos ambientales actuales y garantizar la producción de alimentos saludables y seguros para las generaciones futuras. Algunas de estas prácticas incluyen la reducción del laboreo, que minimiza el uso de maquinaria pesada durante la preparación del terreno para preservar la estructura del suelo y reducir la erosión; el compostaje en la preparación del terreno, que incorpora desechos orgánicos y abonos verdes para mejorar la estructura del suelo y su contenido de nutrientes; y la conservación del agua, utilizando técnicas como riego por goteo y captación de agua de lluvia para optimizar el uso del agua y reducir el desperdicio (Villena et al., 2022).

TEORÍA

Lechuga (*Lactuca sativa*)
Representa un cultivo fundamental en la horticultura debido a su significativo valor nutricional y su alta demanda comercial. En el contexto de una agricultura más sostenible y ecológicamente responsable, los biofertilizantes han surgido como una alternativa eficiente frente a los fertilizantes químicos tradicionales. Estas soluciones biológicas no solo contribuyen a la mejora de la calidad del suelo, sino que también favorecen el crecimiento y desarrollo de los cultivos de manera natural, optimizando los procesos agrícolas sin comprometer el equilibrio ambiental (De Vries, 2010). La lechuga se cultiva ampliamente en diversas regiones del mundo debido a su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y su capacidad de crecimiento rápido. Países como Estados Unidos, España, Italia y México son algunos de los principales productores de lechuga, incluyendo la variedad Trocadero (Arreola, 2022). La producción de este cultivo no solo tiene un impacto significativo en la economía agrícola local, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria global, al proporcionar un suministro constante de vegetales frescos y saludables. El cultivo de lechuga requiere prácticas agrícolas que optimicen el uso de recursos y minimicen los efectos negativos en el medio ambiente. Los métodos convencionales de fertilización, que dependen en gran medida de fertilizantes químicos, han permitido aumentar la productividad, pero también han generado problemas ambientales como la contaminación del agua y la degradación del suelo. La adopción de biofertilizantes puede contribuir a una producción más sostenible y ambientalmente amigable, al mismo tiempo que mejora la salud del suelo y la calidad de los cultivos.

La lechuga se destaca como una de las hortalizas más consumidas en el mundo, gracias a su increíble versatilidad culinaria. Es un ingrediente esencial en ensaladas frescas, sándwiches variados y como guarnición en una multitud de platos, lo que la convierte en un alimento básico en diversas cocinas. Esta popularidad no solo refleja su aceptación universal, sino también su capacidad para adaptarse a distintos contextos y preferencias gastronómicas. La alta demanda de lechuga impulsa su cultivo a gran escala, resultando en un negocio rentable para los agricultores (Saavedra et al., 2017). Además, su ciclo de crecimiento relativamente corto y la facilidad con la que se puede cultivar en diferentes climas y suelos, hacen de la lechuga una opción atractiva para la producción agrícola. Así, la lechuga no solo enriquece nuestras comidas, sino que también sostiene un

importante sector de la economía agrícola. Desde el punto de vista agronómico, la germinación y crecimiento de la lechuga dependen de condiciones ambientales específicas. Se desarrolla mejor en climas templados, con temperaturas óptimas entre 15 y 18°C. Aunque tolera heladas débiles, es susceptible a estrés térmico en etapas cercanas a la cosecha, afectando la calidad del follaje (Giaconi et al., 2001).

El cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) está sujeto a la incidencia de diversas enfermedades que afectan su producción y calidad. La severidad e impacto de estas patologías dependen de múltiples factores, incluyendo el agente causal, la susceptibilidad genética de la planta y las condiciones ambientales predominantes. La adecuada gestión de estas enfermedades es fundamental para minimizar pérdidas productivas, reducir la contaminación ambiental asociada al uso de fungicidas sintéticos y optimizar los costos de manejo (Blancard, 2012). El enfoque más eficiente para el control fitosanitario en lechuga es la implementación del Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE), el cual prioriza estrategias sostenibles y preventivas. Este método busca mantener los niveles de incidencia dentro de parámetros aceptables mediante prácticas culturales adecuadas, monitoreo constante de enfermedades, aplicación de medidas de control mecánico y una evaluación continua de las estrategias utilizadas. La optimización del MIPE permite mejorar la eficiencia en la producción, garantizar la sanidad del cultivo y contribuir a la sostenibilidad agrícola a largo plazo. Para manejar eficazmente las malezas se recomienda un sistema de producción integrado que incluya promover la competitividad, evitar su ingreso y proliferación, aplicar tratamientos no químicos al suelo, control mecánico y control químico (Rojas et al., 2010). La determinación precisa de la madurez de la lechuga antes de la cosecha es esencial para garantizar su calidad y viabilidad comercial. Los criterios de madurez varían según el tipo de lechuga, pero generalmente están asociados al peso, la compactación y la resistencia a la abrasión. En el caso de las escarolas, se considera óptima una cabeza compacta, cuya firmeza pueda verificarse mediante una moderada compresión manual. Las cabezas inmaduras y mate suelen presentar un mejor perfil organoléptico y menor susceptibilidad a problemas postcosecha. Para su comercialización, se recomienda que la lechuga presente un color verde brillante, con hojas crujientes y turgentes, características clave para asegurar la aceptación del producto en el mercado (Cantwell et al., 2002). Este conocimiento sobre el origen, domesticación y fisiología de *Lactuca sativa* es fundamental para la optimización de su producción y la conservación de su diversidad genética, aspectos clave en la seguridad alimentaria y sostenibilidad agrícola.

Biofertilizantes

Los biofertilizantes son productos biológicos que contienen microorganismos benéficos, como hongos micorrícicos y bacterias, cuya inoculación en las plantas contribuye a mejorar su nutrición y protección (Grageda et al., 2012). Estos microorganismos están naturalmente presentes en el suelo, pero su población puede verse afectada por el manejo agrícola intensivo y el uso excesivo de agroquímicos, lo que resalta la importancia de su aplicación controlada para mantener la salud del suelo y promover un desarrollo vegetal óptimo. El uso de microorganismos con fines agrícolas tiene antecedentes históricos que datan de siglos atrás, como la inoculación de hongos en plántulas de encino para la producción de trufas (Cruz et al., 2021). En el siglo XIX, la combinación de suelo con semillas permitió la inoculación de leguminosas en Estados Unidos, y posteriormente, se patentaron procedimientos específicos para la aplicación de *Rhizobium spp.* (Barea et al., 2016). A pesar de su declive tras la industrialización y urbanización posteriores a 1945, la crisis energética de la década de 1970 impulsó su estudio en diversos países europeos y asiáticos, fortaleciendo su implementación en modelos agrícolas sustentables (Grageda et al., 2012).

Dentro de los biofertilizantes, las micorrizas constituyen una de las asociaciones simbióticas más extendidas en el reino vegetal, presentes en aproximadamente el 90% de las plantas terrestres (Grageda et al., 2012). Estos hongos incrementan la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes esenciales como fósforo (P), nitrógeno (N), potasio (K) y calcio (Ca), mejoran la tolerancia de las plantas a condiciones adversas del suelo, como pH extremo y variaciones térmicas (Honrubia, 2006). Además, favorecen la salud radicular, prolongan la actividad funcional de las raíces y contribuyen a la estabilidad estructural del suelo mediante la secreción de glomalinas. Los biofertilizantes juegan

un papel fundamental en la agricultura sostenible, ya que optimizan la fertilidad del suelo, disminuyen la dependencia de insumos sintéticos y refuerzan la resiliencia de los cultivos ante condiciones ambientales adversas y la incidencia de patógenos. En el artículo de Téllez et al. (2022), titulado “el papel de las micorrizas en la agricultura”, los autores hablan sobre el estudio de la ecología y el funcionamiento de las micorrizas en los ecosistemas agrarios, se destaca que estas son esenciales para la mejora del crecimiento y productividad de los cultivos.

La inoculación por esporas se destaca como un método efectivo, mientras que el uso directo de suelo debe ser manejado con cuidado para evitar impactos negativos, en donde consideran continuar evaluando y desarrollando metodologías específicas para cada especie de micorriza permitirá un manejo más eficiente y sostenible, potenciando el uso de micorrizas en la agricultura (Tellez et al., 2012). Por lo que la incorporación de biofertilizantes en los sistemas agrícolas promueve modelos productivos más eficientes y ambientalmente responsables, impulsando prácticas que favorecen el equilibrio ecológico y la seguridad alimentaria a largo plazo.

Los biofertilizantes, elaborados a partir de materiales naturales como residuos vegetales y animales, así como microorganismos beneficiosos como hongos micorrícicos y bacterias promotoras del crecimiento, no solo proporcionan los nutrientes esenciales necesarios para el crecimiento de las plantas, sino que también mejoran la estructura y la fertilidad del suelo a largo plazo. Estos biofertilizantes fomentan la actividad microbiana en el suelo, facilitando la absorción de nutrientes y agua, y promoviendo un ambiente saludable para el desarrollo de las raíces y las plantas en general. A diferencia de los fertilizantes químicos, que pueden liberar nutrientes rápidamente y causar efectos adversos como la lixiviación de nitratos, los biofertilizantes liberan nutrientes de manera más gradual, lo que favorece un desarrollo más equilibrado de las plantas. La aplicación de biofertilizantes puede tener múltiples beneficios, tales como la reducción de la dependencia de productos químicos, la disminución de la contaminación del suelo y del agua, y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. Sin embargo, es crucial evaluar científicamente la eficacia de diferentes biofertilizantes para determinar su impacto real en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (García, 1983).

Históricamente, el uso de microorganismos para estimular el crecimiento de plantas se remonta a siglos atrás, con prácticas como la inoculación de hongos en plántulas de encino para producir trufas (Cruz et al., 2021). En el siglo XIX, la práctica de mezclar suelo con semillas se utilizó para inocular leguminosas en Estados Unidos, y se registraron patentes para la inoculación con Rhizobium spp. (Barea et al., 2016). Las micorrizas mejoran el estado nutricional de las plantas mediante varios mecanismos: incrementan el volumen de exploración de las raíces, mejoran la captación de agua y nutrientes como P, N, K y Ca, incrementan la tolerancia a cambios de temperatura y acidez extrema del suelo, proveen protección contra ciertos patógenos, mantienen las raíces activas por más tiempo y mejoran la estructura del suelo gracias al micelio y la secreción de glomalinas, en este contexto, las micorrizas tienen un gran potencial en la agricultura sostenible (Honrubia, 2006). En este sentido, Kohler (2008), realizó un estudio en donde evaluaron el uso de biofertilizantes en lechuga, los resultados muestran que los fertilizantes mejoraron significativamente el crecimiento y rendimiento del cultivo en comparación con el control sin fertilización, además, que no encontraron indicios de que las aplicaciones produzcan una modificación significativa de las comunidades microbianas nativas, lo que subraya el carácter de sostenibilidad para su aplicación en el agroecosistema (Kohler, 2008).

PARTE EXPERIMENTAL

El presente estudio se llevó a cabo en la Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas, la cual se localiza en la carretera México 54, Cieneguillas, Zac. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar, con dos grupos, al primero (Grupo 1) se aplicó la dosis sugerida a tres tratamientos con diferentes biofertilizantes y un tratamiento de control sin ningún tipo de fertilizante, al segundo grupo (Grupo 2) se aplicó el doble de la dosis sugerida. Se seleccionó la variedad específica de lechuga de la especie *Lactuca sativa*, concretamente la variedad Trocadero.

Se realizó un monitoreo semanal del crecimiento, recolección de datos y evaluación del rendimiento al final del ciclo de cultivo. En cuanto a la calidad en peso de la lechuga, esta variedad suele tener un peso promedio de 180-400 gramos por unidad, dependiendo de las condiciones de cultivo y manejo. En este estudio se emplearon tres productos biológicos con microorganismos benéficos destinados a optimizar el crecimiento, nutrición y resistencia de las plantas.

- Inóculo biológico compuesto por hongos del género *Glomus* y rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) (Fosfonat). Estos microorganismos facilitan la absorción de agua y nutrientes, fijan nitrógeno atmosférico, solubilizan fosfatos y sintetizan hormonas de crecimiento como giberelinas y citoquininas, favoreciendo el desarrollo del sistema radicular y la salud general de las plantas.
- Producto hidrosoluble diseñado para fortalecer la vitalidad y el sistema inmunológico vegetal (Pentacil). Su formulación incluye cinco especies del género *Bacillus: B. amyloliquefaciens, B. licheniformis, B. pumilus, B. simplex* y *B. subtilis.* Estas bacterias contribuyen a la protección de las hojas frente a la radiación UV y otros factores ambientales adversos.
- Mejorador de suelos hidrosoluble que estimula el sistema radicular y fortalece la resistencia de las plantas (Bactiva). Contiene cepas altamente efectivas de *Bacillus subtilis y Trichoderma*, así como bacterias productoras de hormonas de crecimiento vegetal, entre ellas *Giberellias y Pseudomonas fluorescens*. Su acción es esencial durante la germinación y regeneración de raíces dañadas, además de facilitar la fijación de nitrógeno y la solubilización del fósforo no disponible en el suelo.

La integración de estos bioinoculantes en el sistema agrícola representa una estrategia sostenible para mejorar la nutrición de los cultivos, fortalecer la resiliencia vegetal y optimizar el rendimiento agronómico. La dosificación adecuada de biofertilizantes es esencial para optimizar su impacto en la agricultura sostenible, garantizando la salud del suelo y el equilibrio ecológico. Su correcta aplicación, basada en las necesidades del cultivo y las condiciones del terreno, no solo mejora la productividad, sino que también fortalece la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema agrícola. En el presente estudio, se empleó la dosis recomendada por la ficha técnica del producto y una dosis doble para evaluar posibles beneficios adicionales como se muestra en la tabla 1, asegurando una nutrición eficiente sin afectar la planta.

Tabla 1. *Dosificación de Tratamientos con biofertilizantes para Lechuga Trocadero (Lactuca sativa)*

	Producto	Cantidad (g)
Grupo 1 (dosis recomendada)	Fosfonat (T1)	1
	Pentacil (T2)	1
	Bactiva (T3)	1
Grupo 2 (dosis doble)	Fosfonat (T4)	2
	Pentacil (T5)	2
	Bactiva (T6)	2
Control	---	---

La sincronización en la aplicación de biofertilizantes es crucial para potenciar su efectividad en los cultivos. Determinar el momento óptimo de aplicación, considerando el ciclo de crecimiento, las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas locales, mejora la absorción de nutrientes y el desarrollo vegetal. Ajustar los tiempos de aplicación no solo incrementa el rendimiento, sino que también favorece un manejo sostenible de los recursos naturales. En este estudio, la primera aplicación se realizó al momento del trasplante, seguida de dos aplicaciones semanales durante las seis primeras semanas de tratamiento. Para asegurar una distribución uniforme y efectiva de los biofertilizantes, cada producto fue diluido en agua de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Al concluir el trabajo experimental, se procedió a la evaluación de diversas métricas para

determinar el impacto de los tratamientos aplicados. Se midió la altura de cada planta y se contó el número de hojas para evaluar el crecimiento vegetativo. Además, se determinó el rendimiento a través del peso fresco de la cosecha, registrando cuidadosamente la producción de cada planta. Estos datos permitieron una comparación precisa y objetiva entre los diferentes tratamientos, proporcionando información valiosa sobre su eficacia y efectos en el desarrollo y productividad de las plantas. En esta investigación, se implementó un diseño experimental por bloques al azar, una metodología esencial para asegurar la validez y la precisión de los resultados en estudios agronómicos.

Al realizar el estudio por bloques al azar, se logra una mayor precisión y confiabilidad en la comparación de los tratamientos, ya que se reduce el error experimental asociado a las diferencias intrínsecas del terreno. Al final del trabajo, los datos se recolectaron a través de mediciones periódicas, para posteriormente, analizarlos utilizando métodos estadísticos apropiados, como el análisis de varianza (ANOVA), con el fin de identificar diferencias significativas entre los tratamientos.

RESULTADOS

El cultivo de lechuga Trocadero se desarrolló bajo un diseño experimental riguroso, con parcelas homogéneas asignadas aleatoriamente a distintos tratamientos con biofertilizantes. Se realizó un monitoreo constante, registrando datos clave sobre crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas. La recolección incluyó mediciones periódicas de diámetro, número de hojas y biomasa fresca, garantizando la validez y reproducibilidad de los resultados. Para optimizar el desarrollo del cultivo, se realizó una preparación del terreno en varias etapas clave. Primero, se llevó a cabo una limpieza exhaustiva de malezas para evitar la competencia por nutrientes y agua. Luego, se efectuó la labranza, mejorando la estructura del suelo, facilitando la aireación, el drenaje y la penetración de raíces. Además, este proceso favoreció la incorporación de materia orgánica, aumentando la fertilidad y la capacidad de retención de humedad del suelo.

Antes del trasplante, se prepararon las camas de siembra, enriqueciendo el suelo con materia orgánica y asegurando una correcta aireación y drenaje. Se realizó el trasplante de lechugas cuando las plántulas tenían aproximadamente cuatro semanas de edad, momento en el cual presentaban entre cuatro y seis hojas verdaderas, indicativo de su vigor y adecuada preparación para el trasplante. El procedimiento de trasplante se llevó a cabo con sumo cuidado para minimizar el estrés en las plantas y asegurar su éxito en el nuevo ambiente de cultivo. Durante las primeras semanas tras el trasplante, se prestó especial atención a las necesidades hídricas y nutricionales de las plantas. Se implementó un riego frecuente pero controlado, asegurando que el suelo permaneciera húmedo, pero no encharcado, lo cual es crucial para evitar el desarrollo de enfermedades fúngicas. Además, se realizaron aplicaciones de biofertilizantes de manera regular, siguiendo las recomendaciones técnicas para promover un crecimiento óptimo, también, se monitorearon de cerca las condiciones ambientales y se implementaron medidas de protección contra plagas y enfermedades. Las malezas en el cultivo de lechuga pueden afectar significativamente la productividad y calidad debido a la absorción de luz, humedad, minerales y espacio, los daños directos en las plantas pueden incluir la eliminación o daño de hojas y tallos, lo que dificulta el uso y manejo del equipo agrícola. Por otro lado, los daños indirectos suelen ser causados por plagas y enfermedades, las cuales pueden debilitar las plantas, reducir su vigor y hacerlas más susceptibles a otros factores adversos.

La cosecha de lechuga es un proceso meticuloso que requiere varios pasos cruciales para garantizar la calidad y frescura del producto final. En este caso, el momento de la cosecha se llevó a cabo el 28 de noviembre de 2024, aproximadamente 70 días después de la siembra. Para asegurar que las lechugas estuvieran en su punto óptimo, se verificó que las cabezas de lechuga alcanzaran el tamaño y la consistencia adecuados. La cosecha se realizó temprano en la mañana para minimizar el estrés térmico y preservar la frescura. Cada planta fue cuidadosamente cortada a nivel del suelo, evitando daños en las hojas exteriores que podrían afectar su apariencia y calidad. Posteriormente, las lechugas cosechadas se trasladaron rápidamente a un área de almacenamiento fresco para

prevenir el deterioro y prolongar su vida útil. Una vez cosechadas, las plantas de lechuga se pesaron individualmente para determinar el peso fresco, un indicador crítico del rendimiento y la calidad del cultivo

Peso

En la figura 1, se observa el peso final de las lechugas del Grupo 1, en donde el peso mayor para del Tratamiento de Fosfonat con 777 g lo presentó la L6 y la de menor fue la L2 con 191 g. En este mismo sentido, para el Tratamiento de Pentacil, la de mayor peso lo presentó la L7 con 447 g y la de menor peso la L4 con 134 g. En el caso de Bactiva, la L8 registró un mayor peso con 338 g y la L7 con 185 g fue la de menor peso. Para el Tratamiento del control, se observó que la L1 tuvo un mayor peso con 395 g, mientras que la de menor peso lo presentaron la L3 y la L5 con 228 g.

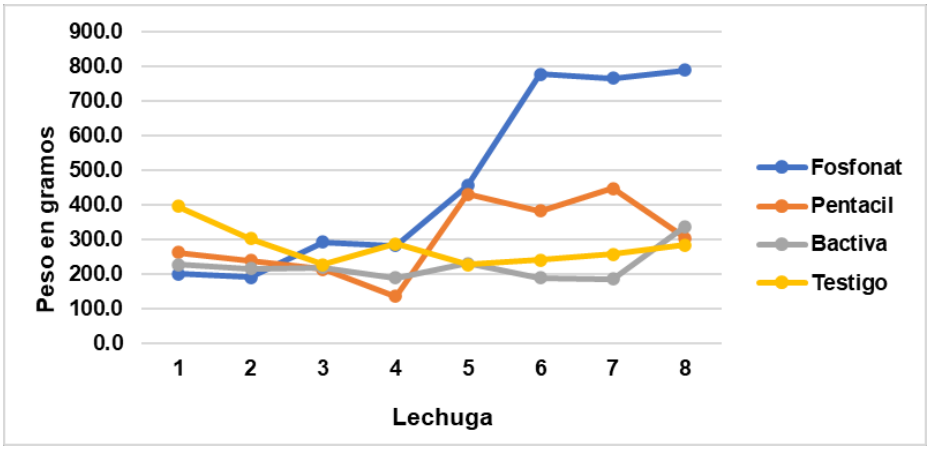


Figura 1. Peso final de las lechugas del Grupo 1.

En la figura 2, se observa el peso final de las lechugas del Grupo 2, para el Tratamiento del Fosfonat, la L8 presentó el mayor peso con 593 g, por el contrario, la L6 al final obtuvo un peso de 103 g. En este mismo sentido, para el Tratamiento de Pentacil, la L8 presentó mayor peso con 295 g, y la L1 fue la que presentó un menor peso con 159 g. En el caso de Bactiva, la L7, fue que la obtuvo mayor peso con 385 g y la L2 fue la de menor peso con 171 g. Para el Tratamiento del control, se observó que la L1 tuvo un mayor peso con 395 g, mientras que la de menor peso lo presentaron la L3 y la L5 con 228 g.

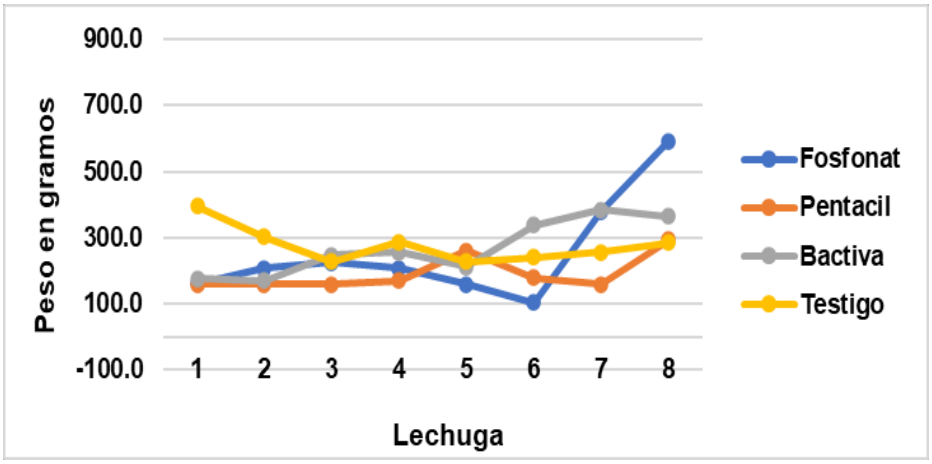


Figura 2. Peso final de las lechugas del Grupo 2.

Como se muestra en la figura 3, los promedios de los pesos finales de los tratamientos Grupo 1 obtuvieron un peso mayor que las del Grupo 2 para el caso de Fosfonat, para estos Tratamiento, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tratamientos en donde el valor *p* de la tabla, es mayor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza. En este sentido, las lechugas tratadas con Pentacil, las del Grupo 1 al final presentaron un peso mayor en comparación con las del Grupo 2, para estos Tratamientos, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los Tratamientos ($p > 0.05$). Para el caso de Bactiva, la media del peso de las lechugas del Grupo 2 es mayor que las del Grupo 1, para estos Tratamientos, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de estos, en donde el valor *p* de la tabla, es mayor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza, concordando con los resultados de Mestre et al. (2024), en su trabajo realizaron la aplicación de un biestimulante en lechuga, esta al final mostró una ligera disminución respecto a la fertilización tradicional (Mestre et al., 2024).

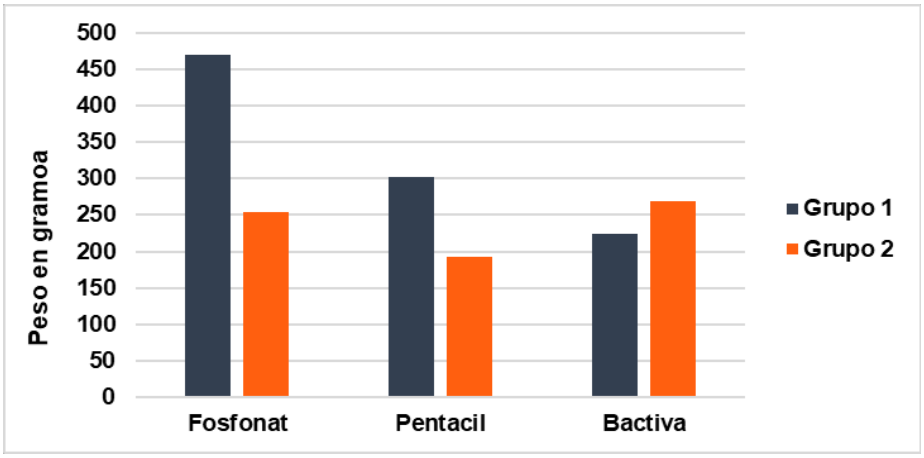


Figura 3. Peso promedio final del Grupo 1 vs el Grupo 2.

Diámetro

El diámetro de la lechuga es un parámetro crucial de calidad, ya que indica un buen crecimiento y desarrollo de la planta, reflejando que ha recibido suficientes nutrientes y agua bajo condiciones óptimas de cultivo. El la figura 4, se observa el diámetro de las lechugas del Grupo 1, para el Tratamiento del Fosfonat, la L7 obtuvo el mayor peso con 21 cm, y la L4 fue la obtuvo el valor más bajo con 9 cm. Por otro lado, en las tratadas con Pentacil, la L8 obtuvo un diámetro de 16 cm y la L4 presento un diámetro menor con 8 cm. Para el caso del tratamiento de Bactiva, la L9 presentó un diámetro de 14 cm y la de menor resultado fue la L3 con 10 cm. Para el Tratamiento del control, se observó que la L1 tuvo un mayor diámetro con 13 cm, mientras que la de menor peso lo presentaron la L8 con 8 cm.

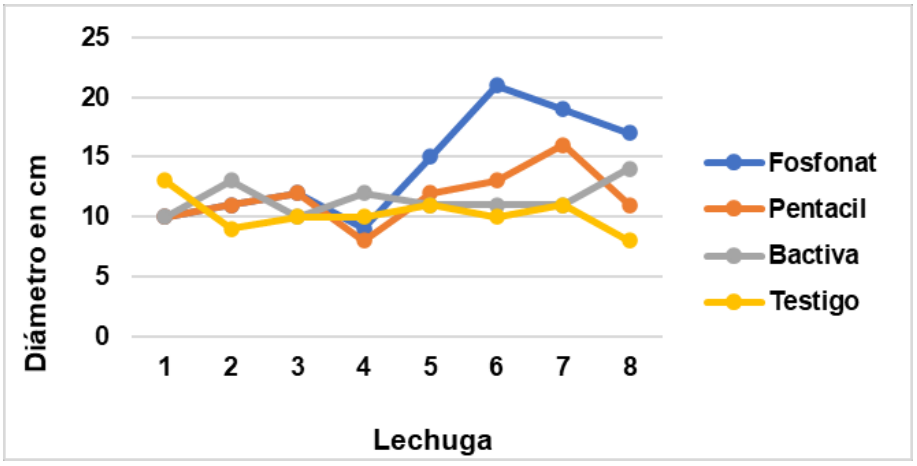


Figura 4. Diámetro de las lechugas del Grupo 1 de los diferentes tratamientos.

El diámetro de las lechugas del Grupo 2, en la figura 5 se observa que en el tratamiento de Fosfonat, la que obtuvo mejor resultado fue la L8 con 16 cm, y la L1 presentó un menor diámetro con 6 cm. En el caso de las lechugas tratadas con Pentacil, la L8 presentó el mayor diámetro de 14 cm con respecto a las lechugas del tratamiento, por otro lado, la L3 tuvo un valor final de 4 cm. Por último, para las lechugas tratadas con Bactiva, se observó que la de mayor diámetro fue la L8 con un valor de 11 cm, y la L5, obtuvo el valor menor con 5 cm. Para el Tratamiento del control, se observó que la L1 tuvo un mayor diámetro con 13 cm, mientras que la de menor peso lo presentaron la L8 con 8 cm.

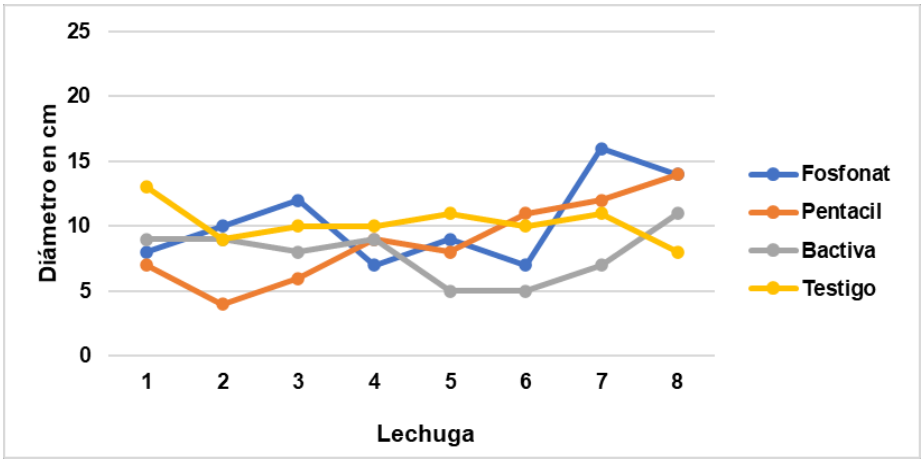


Figura 5. Diámetro de las lechugas del Grupo 2 de los diferentes tratamientos.

Como se muestra en la figura 6, los promedios del diámetro final de los tratamientos del Grupo 1, los cuales obtuvieron un diámetro mayor que las del Grupo 2. Para el caso de Fosfonat, para estos Tratamiento, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tratamientos en donde el valor *p* de la tabla, es menor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza. Para las lechugas tratadas con Pentacil, las del Grupo 1 al final presentaron un diámetro mayor en comparación con las del Grupo 2, para estos Tratamientos, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los Tratamientos ($p > 0.05$). Por último, para el biofertilizante Bactiva, la media del peso de las lechugas del Grupo 1 es mayor que las del Grupo 2, para estos Tratamiento, existe una diferencia estadísticamente ($p < 0.05$) significativa entre las medias de los tratamientos en donde el valor *p* de la tabla, es menor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza.

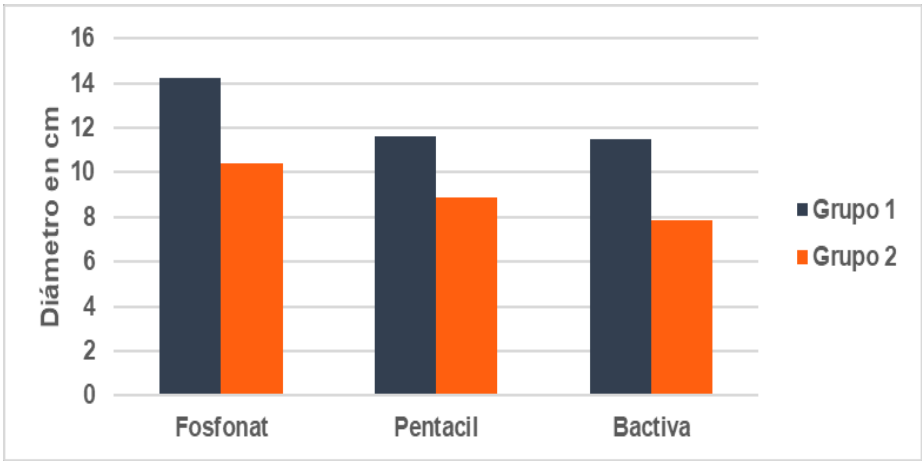


Figura 6. Promedios finales del diámetro de las lechugas del Grupo 1 vs Grupo 2

Número de hojas
Para el número final de hojas, se presenta en la figura 7, en donde se muestra que para el Tratamiento de Fosfonat, la que obtuvo un mayor número de hojas fue la L8 con 20 y la de menor cantidad fue la L2 con 6. En este sentido, en el Tratamiento Pentacil, la L7 presentó 22 hojas y la L4 solo 8, en el Tratamiento de Bactiva, la que obtuvo un mayor número de hojas al final de experimento fue la L4 con 14 hojas y la L3 solo tuvo 7 hojas al final. El Tratamiento control, la L4 tuvo un total de 26 hojas y la L3 solo 12 hojas.

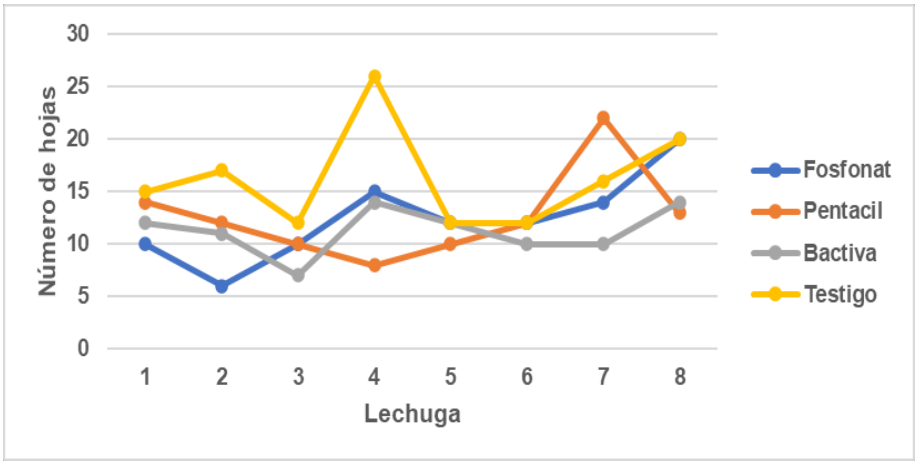


Figura 7. Número final de hojas de los tratamientos del Grupo 1

Para el Grupo 2, en la figura 8, se muestra el número final de hojas de cada Tratamiento, para el caso de Fosfonat, la L4 obtuvo 22 y la L1 tuvo 9 hojas, en el Tratamiento de Pentacil, la L1, L5 y L6 obtuvieron un total de 14 hojas y la L3 tuvo 10 hojas. Para el tratamiento de Bactiva, la L1, L4 y L5 obtuvieron 26 hojas, L3 y L7 obtuvieron 12 hojas. El grupo control la L4 obtuvo 26 hojas y la L5 y L6 un total de 12 hojas.

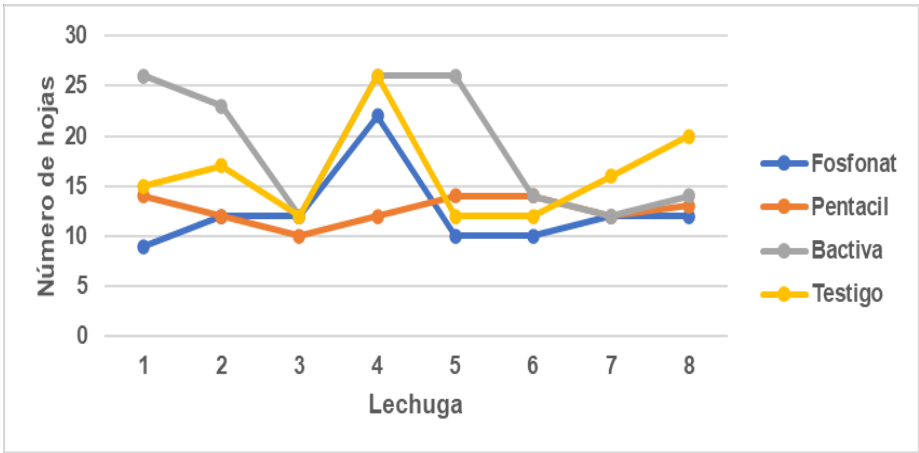


Figura 8. Número final de hojas de los tratamientos del Grupo 2.

Como se muestra en la figura 9, los promedios del número de hojas al final de los tratamientos del Grupo 1, los cuales obtuvieron un número de hojas similar a las del Grupo 2. Para el caso de Fosfonat, para estos Tratamiento, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tratamientos en donde el valor *p* de la tabla, es menor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza. Para las lechugas tratadas con Pentacil, las del Grupo 1 al final presentaron una media de numero de hojas similar a las del Grupo 2, para estos Tratamientos, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los Tratamientos ($p > 0.05$). Para el biofertilizante Bactiva, la media del número de hojas de las lechugas del Grupo 2 es mayor que las del Grupo 1, para estos Tratamiento, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tratamientos en donde el valor *p* de la tabla, es menor a 0.05, el cual es el valor de significancia al tener un nivel de 95% de confianza.

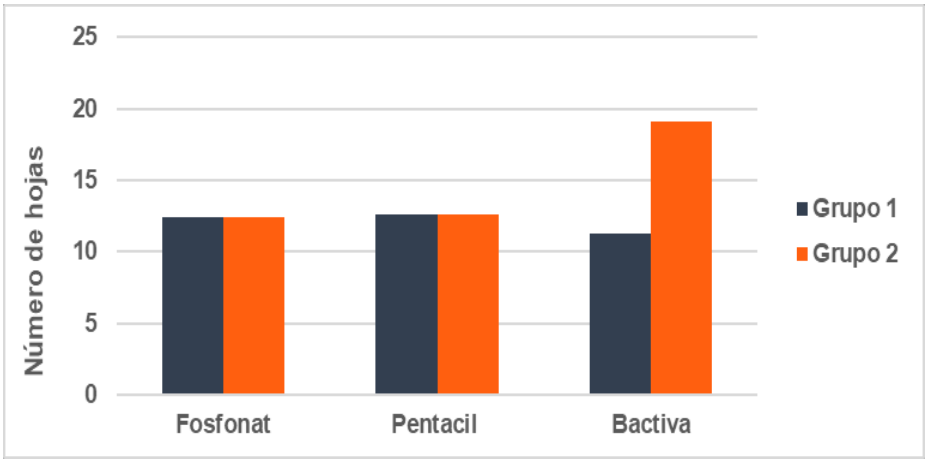


Figura 9. Promedio del número de hojas al final del experimento del Grupo 1 y Grupo 2.

CONCLUSIONES

A lo largo de este estudio se ha podido comprobar que la aplicación de biofertilizantes tiene un impacto significativo en el crecimiento y rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa*). Al evaluar y

comparar los efectos de dosis recomendadas frente a dosis dobles, se han obtenido resultados reveladores que destacan el efecto de estos biofertilizantes en distintas concentraciones.

Las plantas tratadas con los biofertilizantes, no cumplen con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-FF-51-1982 para considerarse un producto de primera calidad, puesto que la producción de biomasa no fue alta, en comparación con aquellas que reciben una fertilización química. A pesar de que las lechugas cultivadas bajo los tres tratamientos con diferentes dosis de biofertilizantes han sido clasificadas como de segunda calidad, presentan características que no afectan su consumo. Estas lechugas pueden mostrar ligeros defectos en la forma, el color o el tamaño de sus hojas; sin embargo, tales imperfecciones son puramente estéticas y no comprometen la calidad nutricional ni la seguridad del producto. La consistencia, frescura y sabor de las hojas se mantienen adecuadas para el consumo humano, proporcionando todos los beneficios que se esperan de un cultivo de lechuga saludable. En este sentido, las lechugas de segunda calidad siguen siendo una opción viable y recomendable para la alimentación diaria, demostrando que las pequeñas variaciones visuales no determinan la capacidad nutritiva del alimento.

La aplicación de biofertilizantes en la producción de lechuga Trocadero, tiene el potencial de ser una estrategia altamente eficaz para optimizar el cultivo, ofreciendo una solución prometedora para enfrentar los desafíos actuales de la agricultura sostenible. Además, se observa que el uso de biofertilizantes no solo es una alternativa viable y sostenible para mejorar la producción agrícola, sino que también contribuye a la reducción del uso de fertilizantes químicos tradicionales, mitigando así el impacto ambiental negativo asociado a su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. A, Arreola. "Creación de cultivo hidropónico en el huerto universitario Muilitaj." Chiapas, México. 2022, pp. 1-44.
2. A.Tellez, D. Abalos, A. Sanz, L. Sanchez, S. Garcia. “El papel de las micorrizas en la agricultura.” *Agricultura*, Vol 957, 2012, pp. 16-20.
3. C.I. Cruz, L.X. Zelaya, G. Sandoval, S.D.L. Santos, E. Rojas, I.F. Chávez, S. Ruíz. “Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos”. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, Vol 12, (5), 2021, pp. 899-913.
4. D. Blancard,; Laterrot, H.; Marchoux, G.; Candresse, *A Colour Handbook—Tomato Diseases: Identification, Biology and Control,* Manson Publishing Manson Publishing Limited: London, UK, 2012; p. 688.
5. G. Saavedra, F. Corradini, A. Antúnez, A. S. Felmer, P. Estay, P. Sepúlveda “Manual de producción de lechuga.”, *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA),* 2017, pp. 27-143.
6. I.M. De Vries. "Origin and domestication of *Lactuca sativa* L." *Genetic Resources and Crop Evolution* Vol 44, 1997, pp. 165-174.
7. J. Kohler. “Aplicación de biofertilizantes para la producción sostenible de lechuga y sus efectos en el sistema suelo-planta.” Universidad de Murcia, 2008.
8. J.M. Barea, M.J. Pozo, Azcón C. "micorrizas." *Agricultura*, DOSSIER, 2016, pp 746-751.
9. L. Rojas, P. Larrin , F. Riveros, C. Sierra, L. Chiang, L. Martinez , E. Alcaino, “Producción integrada de hortalizas en la Región de Coquimbo.” *Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional. INIA N°211*, La serena Chile. 2012.
10. L.F. Martínez, P.L. Bello, Ó.F. Castellanos. “Sostenibilidad y desarrollo: el valor agregado de la agricultura orgánica.” Universidad Nacional de Colombia. 2012.
11. M. Cantwell, T. Suslow. "Fresh-cut fruits and vegetables: aspects of physiology, preparation and handling that affect quality." *Annual Workshop Fresh-Cut Products: Maintaining Quality and Safety*. Vol. 5. Davis, CA, USA: University of California, 1999.
12. M.C. Mestre, F. Fioroni, L.Y. Heinzle, L. Sisón, A. Cardozo, V. Chillo, N. Fernández. "Efecto de biofertilizantes a base de microorganismos de montaña sobre la colonización micorrícica

y el rendimiento de lechuga y zanahoria, en la Patagonia argentina." *Siembra*, Vol. 11, 2024, pp. 4-11.

13. M. Honrubia. “Las micorrizas una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años.” *In Anales del jardín botánico de Madrid*, Vol. 66, 2009, pp. 133-144.
14. M. Villena, C.P. Mora, H. López. "Fertilización sostenible y Gestión Integral de Nutrientes." *Centro de Información de Recursos Naturales(CIREN). 2022.* https://bibliotecadigital. ciren. cl/server/api/core/bitstreams/4149a490-eec5-4413-a123-10218a8574ca/content.● ANEXOS (2022).
15. M.A. García. "Datos sobre la ecología del género Pyrrhocorax (P. pyrrhocorax y P. graculus) en el parque nacional de la montaña de Covadonga, Asturias." *Boletín de Ciencias de la Naturaleza* 28, 1983, pp.1-12.
16. O.A. Grageda, A. Díaz, J.J. Peña, J.A. Vera. “Impacto de los biofertilizantes en la agricultura”. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, Vol. 3, 6, 2012, pp.1261-1274.
17. P. Estay, N. Vitta. “Caracterización de los estados y ciclo de vida de Frankliniella occidentalis sobre plantas de lechuga (*Lactuca sativa*)”. *Sociedad Agronómica de Chile.* XLIX, 1998.
18. Secretaría de Economía. “Norma Oficial Mexicana NOM-FF-51-1982, productos alimenticios no industrializados para uso humano - hortalizas en estado fresco - lechuga.” Diario Oficial de la Federación. 1982. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4791830&fecha=13/01/1983#gsc.tab=0
19. V. Giaconi. “Cultivo de Hortalizas”. Editorial Universitaria, Chile, 2001, pp. 216-221.

ANÁLISIS TOXICOLÓGICO DE TINTES DE CABELLO Y SU IMPACTO AMBIENTAL

Esthefany Ávila Márquez, Veronica Segovia Tagle y Karol Karla García Aguirre

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Academia de Bioingeniería, Zacatecas, Zac., México
esthefanyavilam@gmail.com

RESUMEN

Los tintes de cabello contienen una variedad de compuestos químicos diseñados para modificar la coloración del cabello de manera permanente o temporal. Entre estos, algunas sustancias pueden generar impactos en la salud y el medio ambiente. Uno de los componentes más utilizados es el amoníaco, que actúa abriendo la cutícula capilar para facilitar la fijación del color. Sin embargo, su liberación al medio ambiente representa un riesgo significativo debido a su toxicidad en distintos niveles biológicos. Este estudio evaluó los efectos del amoníaco en modelos biológicos como *Allium cepa*, *Lactuca sativa* y *Artemia salina*. Se realizaron ensayos de toxicidad en los que se expusieron los organismos a soluciones con una concentración de 10 mg/L de tinte de cabello. Para *Allium cepa* se midió el crecimiento radicular tras 72 horas de exposición en condiciones controladas de temperatura (22 ± 2 °C). Para *Lactuca sativa* se midió la germinación bajo las mismas condiciones. En el caso de *Artemia salina*, se realizaron ensayos de toxicidad aguda, registrando la mortalidad de la *Artemia salina* después de 24 horas de exposición en agua salina a 25°C. Este estudio evaluó los efectos del amoníaco en modelos biológicos como *Allium cepa*, *Lactuca sativa y Artemia salina*. Los resultados indicaron que la exposición a concentraciones de 10 mg/L de tinte para cabello provocó una reducción del crecimiento radicular del 50% *Allium cepa*, 35% *Lactuca sativa* y 100% de mortalidad en la *Artemia salina*. Estos hallazgos son preocupantes, ya que compuestos como el amoníaco presente en los residuos de tintes de cabello puede llegar a ecosistemas acuáticos a través de los sistemas de drenaje doméstico, afectando organismos no objetivo y alterando el equilibrio ecológico. A nivel regulatorio, es fundamental establecer límites más estrictos en la concentración de amoníaco permitida en productos cosméticos y mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales para minimizar su impacto ambiental. Además, se recomienda fomentar la investigación y el desarrollo de alternativas menos tóxicas, como tintes a base de extractos vegetales o formulaciones sin amoníaco, que reduzcan el riesgo de contaminación. En conclusión, el uso de compuestos como el amoníaco en la industria cosmética representa una amenaza tanto para la salud ambiental como para la biodiversidad. La evidencia obtenida en este estudio destaca la urgencia de regular su uso y promover prácticas más sostenibles en la formulación de productos capilares, reduciendo así su impacto en los ecosistemas y en la salud pública.

INTRODUCCIÓN

Actualmente ha crecido el interés por los contaminantes emergentes (CE) presentes en el agua con el propósito de realizar la identificación y planteamiento del tratamiento adecuado para minimizar su impacto ambiental. Se ha observado que estos compuestos tienen efectos negativos en la salud humana y en los ecosistemas debido a su bioactividad, persistencia, potencial de bioacumulación y biomagnificación (Balakrishnan, et al. 2024).

Una de las principales fuentes de estos CE son los productos de cuidado personal cuyo consumo en la actualidad es omnipresente y obligatorio debido a las exigencias de estilo de vida y socioculturales. Dentro de estos productos de cuidado personal están los tintes para el cabello. Diversos estudios indican que aún en concentraciones mínimas en el orden de nono o picogramos estos CE pueden tener un impacto en los humanos, las especies acuáticas y terrestres (Doyle, 2020). En México se estima que el mercado de productos en el mercado del color para el cabello se estima crezca en una

tasa promedio anual al año 2029 de 4.82%. Además se estima que aproximadamente el 56% de la población femenina hace uso de estos productos cosméticos.

Los productos para el cabello contienen más de 5000 compuestos químicos que incluyen mutágenos y disruptores endocrinos, dentro de esta gama de compuestos están presentes aminas aromáticas, 2,4-diaminoanisol sulfato y para-Phenylenediamine (PPD) (Eberle, 2020).

Los tintes permanentes contienen compuestos primarios, intermediarios, modificadores y agentes oxidantes y es a través de las reacciones de oxidación que se generan los procesos de coloración, estas reacciones de oxidación (More a , 2024), generan especies reactivas de alta toxicidad.

Los tintes permanentes y semipermanentes suelen contener p-fenilendiamina (PPD), tolueno-2,5-diamina (p-toluilendiamina; PTD), paradiaminas sustituidas como la 2-metoximetil-p-fenilendiamina (ME-PPD) u orto- o para-aminofenoles. Estos compuestos a través de reacciones de oxidación dan origen a moléculas coloridas, sin embargo estos precursores del color están clasificados como extremadamente tóxicos (Babić , et al. 2023).

Dada la cantidad de datos contradictorios en relación a la toxicidad de los tintes para el cabello, se necesitan estudios toxicológicos para establecer mejor los riesgos asociados a la exposición a los tintes capilares y abordar este importante problema de salud pública (He, et al., 2022). Los tintes de cabello, al contener mezclas complejas de sustancias, pueden interferir con procesos celulares, generar estrés oxidativo, alterar la permeabilidad de membranas, e incluso inducir mutaciones. Su comportamiento en el ambiente depende de su solubilidad, persistencia, y afinidad con la materia orgánica, por lo que es necesario evaluar su toxicidad y valorar los riesgos potenciales para el desarrollo humano.

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio fue un estudio tipo agudo en el cual se evaluó el efecto tóxico de un tinte para cabello comercial. Se realizaron pruebas independientes con las siguientes concentraciones:1, 10 y 100 mg/L en agua destilada, como control se empleó agua potable.

Los sistemas empleados para la evaluaciones toxicológicas fueron :*Allium cepa, Lactuca sativa y Artemia salina.*

Ensayo de toxicidad con *Allium cepa*

Los bulbos de cebolla (*A. cepa*) se consiguieron localmente. Antes de iniciar la prueba, las capas exteriores de las cebollas serán removidas cuidadosamente sin destruir los primordios de la raíz. Una serie de tres bulbos de cebolla se colocaran en agua de la llave y el mismo número de especímenes serán expuestas a la solución de prueba en las concentraciones de 1, 10 y 100 mg/L miligramos de tinte en agua destilada. Las mediciones se realizaron a las 72 horas después de la exposición. Los bulbos de cebollas se mantuvieron bajo luz natural y a temperatura ambiente (23 ± 2 ° C). Se utilizó agua potable como control. Al final del período de exposición, se midieron las longitudes de las raíces de cada bulbo. Usando los promedios ponderados para el grupo tratado con la muestra problema y el control, se calculó el porcentaje de inhibición del crecimiento radicular en relación al control (ec. 1) (Fiskesjo,1985).

$$\frac{longitud\ raíz\ control - longitud\ raíz\ muestra}{longitud\ raíz\ control} x100 \ldots\ldots\ldots \text{ ec. 1}$$

Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa L*.

Las semillas a utilizar serán seleccionadas buscando un tamaño homogéneo, para posteriormente hacer un lavado en un vaso de precipitados con 10 mL de hipoclorito de sodio con una concentración del 4%, por un periodo de 15 min, posteriormente las semillas se pasan a un vaso de precipitados con 25 mL de agua destilada por 1 hora, para finalmente colocarlas en papel secante. Las concentraciones en los grupos de trabajo fueron las siguientes:1, 10 y 100 mg/L miligramos de tinte en agua destilada. Se evaluó el efecto en la germinación, colocando 5 semillas en un tubo cónico con la ayuda de unas pinzas y una aguja de disección, posteriormente se agregaron 2 mL de la solución a evaluar. Cada concentración se evaluó por triplicado. Se dejaron en incubación a 21°C por 120 horas en oscuridad. Se realizó la cuantificación del número de semillas. Se obtuvo el porcentaje relativo de germinación (RSG) con la ecuación 2 y el porcentaje relativo de elongación de la raíz (RRG) con la ecuación 3 (Hoekstra, Bosker, & Lantinga, 2002).

$$\frac{número\ de\ semillas\ germinadas\ en\ la\ solución\ de\ tinte}{número\ de\ semillas\ germinadas\ en\ el\ control} x100 = RSG \ldots\ldots\ldots \text{ ec. 2}$$

$$\frac{longitud\ radicular\ en\ el\ tinte}{longitud\ radicular\ en\ el\ control} x100 = RRG \ldots\ldots\ldots \text{ ec. 3}$$

Ensayo de toxicidad aguda en larvas de *Artemia salina L.*

Para el ensayo de toxicidad aguda en larvas de Artemia salina se consideraron tres concentraciones del agente problema (1, 10 y 100 mg/L) y un grupo control, con tres réplicas cada tratamiento. Se realizó simultáneamente la evaluación de la toxicidad de las muestras empleando un grupo control utilizando agua destilada. Se colocan en cada placa de Petri de 100 mm de diámetro 4.95 mL de agua de mar artificial (AMA) previamente preparada, se añadió una alícuota de 500µL conteniendo al menos 10 larvas, luego se añadieron 4.95 mL de la dilución con el agente de prueba. Se incubaron durante 24 horas a una temperatura de 25± 2°C en periodos de luz y oscuridad. Después de las 24 horas las cajas de Petri serán observadas al microscopio estereoscópico para evaluar el número de organismos muertos, usando el criterio de inmovilización por 10 segundos. Se determinó el porcentaje de mortalidad para cada concentración y el grupo control mediante la ecuación 4.

$$\%\ mortalidad\ = \frac{larvas\ muertas}{larvas\ totales} x\ 100 \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ ec. 4}$$

La toxicidad será interpretada en función del porcentaje de letalidad: 0-10 % no tóxico, 11- 50 % moderadamente tóxico, 51-90 % altamente tóxico y 100 % extremadamente tóxico(Vanhaecke, 1984).

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los bioensayos realizados, presentando un efecto toxicológico dependiente de la concentración en todos los modelos evaluados. Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Mondal y Debnath (2022) empleando como organismos modelo *Cicer arietinum L.* y *Allium cepa* L. para evaluar el efecto citotóxico de tintes comerciales sintéticos y a partir de fuentes naturales como la henna.

La citotoxicidad observada como una reducción en el crecimiento radicular en los modelos de *Allium cepa* y *Lactuca sativa* se puede atribuir a la presencia de compuestos presentes en el tinte capilar comercial inhibidores del proceso de división celular como el amoniaco, el peróxido de hidrógeno y la parafenilendiamina (PPD), que puede afectar la formación de los microtúbulos (Dwivedi, 2015).

Tabla 1. Resultados del efecto toxicológico del tinte para cabello en organismos modelo

Concentración del tinte (mg/mL)	% de inhibición radicular en *Allium cepa*	RRG en *Lactuca Sativa*	% de mortandad en *Artemia salina*
1	30	15	100
10	50	35	100
100	70	60	100

Nota: Cada valor representa el promedio de tres repeticiones de la misma muestra.

En el caso de los resultados observados en *Artemia salina*, Manjunatha et al. (2014) reportan en embriones de pez Cebra el efecto toxicológico de tintes capilares observando cambios morfológicos y fisiológicos en concentraciones de 200 y 275 µM, lo que es congruente con el efecto observado en la mortalidad de la artemia aín en la concentración más baja evaluada de 1 mg/mL.

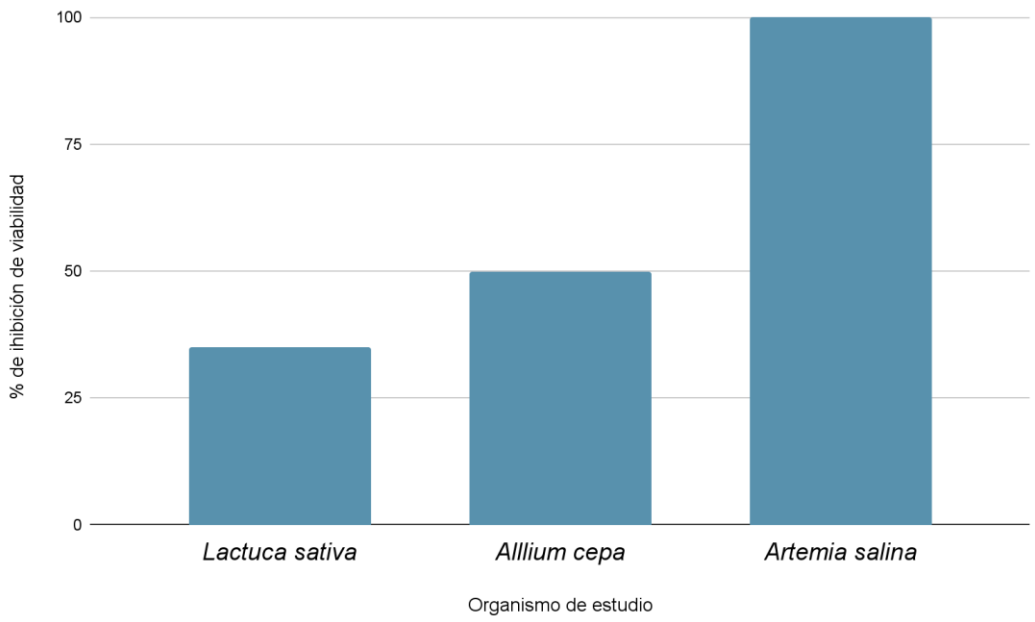


Figura 1. Comparación del efecto del tinte de cabello a una concentración de 10 mg/L en organismos bioindicadores.

En la figura 1, se muestra que la susceptibilidad de cada organismo a la composición del tinte para cabello comercial evaluado, varía siendo el organismo acuático el más susceptible. En general, el producto cosmético fue citotóxico en los modelos evaluados al reducir la división celular en *Lactuca sativa y Allium cepa* y se corrobora la alta susceptibilidad de los invertebrados como los crustáceos co0mo la *Artemia salina,* donde se presenta estrés fisiológico y unas reducción en la tasa de supervivencia(Khandelwal, et al. 2024).

Los resultados obtenidos indican que la presencia de los compuestos de los tintes para cabello que son vertidos al sistema de drenaje y que no son tratados de manera apropiada en las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden tener un efecto adverso en los sistemas vivos, por lo que se requiere fortalecer las estrategias para su identificación, monitoreo y control.

CONCLUSIONES

Los tintes de cabello generan efectos tóxicos notables en organismos modelo, incluso a bajas concentraciones (1 mg/mL). Se observó inhibición del crecimiento radicular en plantas, la germinación y la toxicidad aguda en organismos acuáticos. Esto sugiere que estos productos cosméticos, una vez liberados al ambiente, tienen un impacto negativo que puede comprometer la biodiversidad, el equilibrio ecológico y potencialmente afectar la salud humana. Es imprescindible mejorar la gestión de residuos cosméticos, incentivar el uso de ingredientes biodegradables y promover estudios adicionales que permitan una evaluación más amplia de los riesgos asociados al uso y disposición de estos productos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Babić Ž, Hallmann S, Havmose MS, Johansen JD, John SM, Symanzik C, Uter W, Weinert P, van der Molen HF, Kezic S, Macan J, Turk R. (2023) Genotoxicity of oxidative hair dye precursors: A systematic review. Hum Exp Toxicol. Jan-Dec;42:9603271231159803. doi: 10.1177/09603271231159803. PMID: 36879522.
2. Balakrishnan, A., Senthilkumar, V., Jeyakumaran, S. R., John, J., Vinodh, K., Kannan, U., Paramasivam, B., (2024) Prioritization of chemicals in personal care products based on persistent, bioaccumulative and toxic (PBT) potential: An Indian perspective, Regulatory Toxicology and Pharmacology, Volume 147, 105563, ISSN 0273-2300, https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2024.105563
3. Dwivedi, K., Kumar, G., 2015. Genetic damage induced by a food coloring dye (sunset yellow) on meristematic cells of Brassica campestris L. J. Environ. Publ. Health. https://doi.org/10.1155/2015/319727.
4. Doyle, S., Meade, E., Fowley, C., Garvey, M., 2020. A comprehensive review of current environmental pollutants of pharmaceutical, agricultural and industrial origin. Eur. J. Exp. Biol. 10 (5).
5. Eberle CE, Sandler DP, Taylor KW, White AJ. (2020) Hair dye and chemical straightener use and breast cancer risk in a large US population of black and white women. Int J Cancer. Jul 15;147(2):383-391. doi: 10.1002/ijc.32738. Epub 2019 Dec 3. PMID: 31797377; PMCID: PMC7246134.
6. Fiskesjö, G. (1985) The Allium test as a standard in environmental monitoring. Hereditas, 102, pp. 99-112
7. He L, Michailidou F, Gahlon HL, Zeng W. (2022) Hair Dye Ingredients and Potential Health Risks from Exposure to Hair Dyeing. Chem Res Toxicol. 2022 Jun 20;35(6):901-915. doi: 10.1021/acs.chemrestox.1c00427. Epub 2, Jun 6. PMID: 35666914; PMCID: PMC9214764.
8. Hoekstra, N., Bosker, T., & Lantinga, E. (2002). Effects of cattle dung from farms with different
9. feeding strategies on germination and initial root growth of cress Lepidium Sativum L). Agric. Ecosyst. Environ(93), 189-196.
10. Khandelwal, D., I. Rana, I., V. Mishra, V., Ranjan, K.R., Singh P. (2024) Unveiling the impact of dyes on aquatic ecosystems through zebrafish – a comprehensive review. Environ. Res., 261 (2024), Article 119684
11. Manjunatha, B.; Wei-bing, P.; Ke-chun, L.; Marigoudar, S. R.; Xi-qiang, C.; Xi-min, W.; Xue, W. (2014). The effects of henna (hair dye) on the embryonic development of zebrafish (Danio rerio). Environmental science and pollution research international, 21 (17), 10361−7.
12. Mondal, N. K., y Debnath, P. (2022) Impact of two commercially available hair dyes on germination, morpho-physiology, and biochemistry of Cicer arietinum L. and cytotoxicity study on Allium cepa L. root tip, Environmental Research, Volume 208, 112681, ISSN 0013-9351, https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112681.

13. More, S., Fung, E. S., Mathis,C., Schulte, A. M., Hollins, D., (2023) Dermal exposure and hair dye: Assessing potential bladder cancer risk from permanent hair dye, Regulatory Toxicology and Pharmacology, Volume 138, 105331, ISSN 0273-2300, https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2022.105331.
14. Vanhaecke P, Persoone G.(1984) The ARC-Test: a standardized short-term routine toxicity test with Artemia nauplii. Methodology and evaluation. Ecotoxicological Testing for the Marine Environ. 1984; 143-157.

ESTABLECIMIENTO DE UN REPOSITORIO *IN VIVO* PARA TIZÓN DE LA HOJA, MANCHA FOLIAR Y ROYA DEL MAÍZ, PROVENIENTES DE ZONAS MAICERAS ALTAMENTE PRODUCTIVAS DE SINALOA

Rosa Luz Gomez Peraza[1], Laura Gabriela Espinosa Alonso[1], Julián Alberto Galaviz Lara[1], Sergio Medina Godoy[1], Rocío Angélica Cortes Rodríguez[2] y Wenceslao Valenzuela Quiñones [1]

1 Instituto Politécnico Nacional - CIIDIR Sinaloa, 2 Colegio de Bachilleres del Estado de Chihuahua Plantel 16.
rgomezp@ipn.mx.

RESUMEN

El maíz, uno de los cultivos de mayor importancia socioeconómica, se ve afectado por diversas enfermedades en su ciclo de vida, lo que impacta su rendimiento y calidad. Entre las más comunes en el maíz se encuentran el tizón foliar, la mancha foliar y la roya, causadas por los patógenos *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis* y *Puccinia polysora*, respectivamente. Estas enfermedades causan pérdidas significativas, especialmente en zonas maiceras del norte de Sinaloa, afectando la producción agrícola. El presente trabajo propone una estrategia para establecer un repositorio *In vivo* de estos patógenos. Para aislar dos de los hongos de interés, se cortó tejido foliar de hojas de maíz con síntomas de la infección por tizón foliar (*E. turcicum*), mancha foliar (*C. zeae-maydis*), de campos de cultivo de Guasave Sinaloa, de la producción otoño-invierno 2023, se desinfectaron (NaClO, 1%) e inocularon en medio agar dextrosa de papa (PDA) y mantuvieron a temperatura ambiente por 7 días. Los hongos desarrollados se identificaron con técnicas microbiológicas convencionales, basadas en las características de la colonia, estructuras reproductivas (conidios, esporangios, clamidosporas) a través de su visualización con microscopio óptico[1,2]. Una vez identificados los hongos de interés, se estableció el repositorio *in vivo*, para ello, se infectaron plantas de maíz con 30 días después de siembra y se mantuvieron a temperatura ambiente, entre 15 a 32 °C y 80% de humedad. Después de 15 días, se observaron manchas largas y angostas en las hojas, con colores que varían entre grisáceo y amarillento, característicos del tizón de la hoja. Manchas necróticas de color gris claro o plateado, que describen la mancha foliar; su posterior aislamiento e identificación morfológica confirmó la infección de los hongos de interés, estableciendo el repositorio *in vivo*. Este repositorio permite la preservación de la viabilidad patogénica, así como su acceso inmediato, sin tener que depender de la recolección de nuevas muestras en campo, lo que permitirá realizar estudios posteriores de interacción entre el maíz y estos patógenos, con la finalidad de desarrollar cultivos más resistentes, así como la implementación de estrategias de manejo más efectivas.

INTRODUCCIÓN

Existen distintas enfermedades que afectan a todas las plantas principalmente en su desarrollo y producción. Uno de los cultivos de mayor importancia económica es el maíz que puede afectarse en cualquier etapa del ciclo de vida reduciendo el rendimiento y calidad del fruto del maíz, las cuales podemos encontrar en enfermedades: fúngicas, bacterianas, virales, parasitarias o por nemátodos (Kumar et al., 2022). Entre las enfermedades más comunes de daño foliar en maíz son: Tizón de la hoja, mancha foliar y roya ocasionadas por *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis* y *Puccinia polysora*.

Tizón de la hoja es ocasionada por *Exserohilum turcicum*, la cual fue descubierta inicialmente en Italia por Passerini en 1876, el cual provocaba daño en las hojas y pérdida en su valor nutricional. Si los síntomas aparecen antes de la floración, las pérdidas de rendimiento pueden ser más del 50% (Tefferi et al., 1996). La enfermedad se puede ver en forma de barco y manchas largas en las hojas de color gris, verde o marrón con rayas elípticas. El principal determinante de la resistencia de la planta huésped y del desarrollo de estrategias efectivas de manejo de enfermedades son la

variabilidad genética y la patogenicidad del agente causal. Se ha informado que la virulencia de este patógeno varía en el maíz dependiendo de la fase de desarrollo del cultivo, presentándose el mayor daño en la etapa de floración (Bigirwa et al., 1993). Este hongo logra sobrevivir en los residuos de las hojas del cultivo, cuando las condiciones son óptimas para su crecimiento y desarrollo, produciendo un sin número de esporas que son distribuidas por largas distancias con la ayuda del viento, llegando a diferentes cultivos o siembras generando una nueva infección primaria, e inicia así un nuevo ciclo (De León, 1997). Por otro lado, la mancha foliar gris es causada por *Cercospora zeae-maydis*, considerado uno de los hongos patógenos foliares más destructivo en todo el mundo, reportándose pérdidas significativas cuando se presenta en etapas tempranas del desarrollo del cultivo, ocasionando pudrición del tallo. La mancha se propaga principalmente a través zonas de alta humedad y una temperatura moderada (Lyimo et al., 2013). En lo que respecta a *Puccinia polysora* se presentan lesiones alargadas, de color anaranjado oscuro a marrón según su estado de madurez, acompañados con restos de tejidos epidérmicos (Ponce & Pinela, 2024). Esta enfermedad suele establecerse durante todo el año, los procesos infecciosos dependen de los factores climáticos y su fase reproductiva de uredosporas y teliosporas, pasando el invierno como uredosporas en las zonas tropicales propagándose a través del viento y las precipitaciones (Yang et al., 2024). Por eso la finalidad del trabajo fue implementar una estrategia que sirva como herramienta en un programa de mejoramiento en el establecimiento de un banco *in vivo* de cepas para un tamizado controlado de los genotipos maíz.

TEORÍA

Importancia del cultivo de maíz

En México el maíz es uno de los principales cultivos que contribuyen a la alimentación básica de los mexicanos, se distribuyó inicialmente en las montañas y valles de México, gracias a la manipulación de los antiguos habitantes de esta región en un proceso de evolución colectiva que llevó a la creación de una de las plantas cultivadas con mayor diversidad genética, cuya abundancia todavía se conserva en este país, principalmente por los productores del entorno rural. El cultivo de maíz (Zea mays) enfrenta diferentes desafíos, como los problemas fitosanitarios y la baja productividad por hectárea ocasionada por daños de plagas y enfermedades, así como los altos costos de producción (Kato, 2009).

Las enfermedades foliares de la planta de maíz son las más visibles a primera vista, debido a que las afectaciones foliares avanzan de las hojas bajas a las altas. Las afecciones foliares de relevancia mundial presentes en el maíz en las regiones tropicales y de clima húmedo son los tizones, las manchas y las royas en las hojas. El maíz es uno de los cultivos que se ven afectado por diversos factores que limitan su producción, entre ellos se encuentran las plagas agrícolas, que son todos aquellos organismos que al aumentar su población en forma descontrolada causan daño al cultivo perjudicando su normal desarrollo (Huici, 2007).

Exserohilum turcicum (Tizón de la hoja del maíz)

Exserohilum turcicum es el agente causal del tizón de la hoja del maíz, una enfermedad foliar que afecta en gran medida en regiones tropicales y subtropicales, la severidad de esta enfermedad en el cultivo está directamente relacionada con los factores climáticos especialmente la humedad relativa. El ciclo biológico de *E. turcicum* en planta se completa generalmente en 18 días después de la inoculación en hojas de maíz. Durante la infección, el hongo penetra las células de la epidermis y se extiende hacia el xilema, bloqueando hasta el 75% de los canales vasculares, lo que interrumpe el transporte de agua y nutrientes. Este bloqueo contribuye a la necrosis del tejido mesofílico y la formación de lesiones necrosadas características. Las pérdidas de rendimiento debido al tizón de la hoja del maíz pueden oscilar entre el 24% y el 91% a nivel mundial, siendo más graves cuando las infecciones ocurren justo antes de la floración. En México, la enfermedad representa una amenaza significativa para la producción de maíz, especialmente en regiones con alta humedad y temperaturas moderadas (Kotze, 2019) y Martínez-Núñez et al., 2022).

Cercospora zeae-maydis (Mancha gris del maíz)

Es un hongo ascomiceto del orden Capnodiales, causante de la enfermedad conocida como mancha gris de la hoja en maíz (*Zea mays*). Este patógeno se distribuye ampliamente en regiones productoras de maíz, donde puede causar pérdidas significativas en el rendimiento del cultivo. La patogenicidad de este patógeno varía según la especie y la cepa, influenciada por la capacidad de degradar la pared celular de la planta, es el agente causal de la mancha gris del maíz, una enfermedad foliar que reduce la fotosíntesis y afecta la calidad del grano y tiene la capacidad de degradar la pared celular de la planta. El ciclo de vida de *C. zeae-maydis* incluye la formación de conidias que germinan en la superficie foliar y penetran las células huésped. La infección progresa a través del mesófilo y puede afectar el xilema, interrumpiendo el transporte de agua y nutrientes. Las condiciones óptimas para el desarrollo de la enfermedad incluyen temperaturas entre 25 y 30°C y alta humedad relativa. *C. zeae-maydis* produce enzimas que degradan la pared celular de la planta, facilitando la penetración y colonización del tejido foliar. La mancha gris del maíz puede causar pérdidas significativas en el rendimiento del cultivo, especialmente cuando las infecciones ocurren durante la etapa de llenado del grano. En condiciones favorables, la enfermedad puede propagarse rápidamente, afectando grandes áreas de cultivo y reduciendo la calidad del grano (Muiru et al., 2010; Zhao et al., 2014).

Puccinia polysora Underw. (Roya)

Es un hongo biotrófico obligado que causa la enfermedad conocida como roya del sur del maíz (*Zea mays* L.), se caracteriza por la aparición de pústulas de color naranja a marrón rojizo en la superficie superior de las hojas, que se oscurecen a medida que el tejido envejece, las infecciones severas pueden llevar a la muerte prematura de las hojas y afectar significativamente el rendimiento del cultivo. El ciclo de vida de *P. polysora* inicia con la producción de uredosporas, las cuales son dispersadas por el viento y germinan en la superficie foliar de las plantas hospedantes, el hongo penetra a través de las estomas y coloniza el mesófilo, lo que provoca necrosis y reduce significativamente la capacidad fotosintética de las hojas infectadas (Tsatsia & Jackson, 2019). Las condiciones óptimas para el desarrollo de la enfermedad son temperaturas cálidas (25 - 30 °C) y alta humedad relativa (Wang et al., 2021). Además, como *P. polysora* es un patógeno obligado, no sobrevive en restos de cultivos muertos, lo que hace que su ciclo dependa de plantas vivas o de fuentes externas durante la temporada de cultivo, el impacto económico de la roya del sur del maíz puede ser devastador. En condiciones favorables para el hongo y en variedades susceptibles, las pérdidas pueden superar el 80% del rendimiento potencial (Brewbaker et al., 2011). Esto se debe tanto a la reducción directa en la superficie fotosintética como al debilitamiento general de la planta. Los granos producidos en plantas infectadas suelen ser de menor calidad y peso, lo cual compromete la rentabilidad del cultivo, especialmente en regiones donde el maíz es un cultivo básico (Wang et al., 2021). El control de *P. polysora* se basa en un enfoque integrado que incluye el uso de variedades resistentes, prácticas culturales como la siembra escalonada y la rotación de cultivos, y el uso de fungicidas (Crouch & Szabo, 2011).

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención de plantas de maíz con síntomas de enfermedades foliares.

La colecta de plantas con síntomas de enfermedades foliares (Tizón de la hoja, mancha foliar y roya) del maíz, se colectaron en distintos campos agrícolas de las principales zonas productoras de maíz. Las muestras consistieron en cinco hojas sintomáticas recolectadas de las esquinas y el centro de cada campo agrícola (n=25). Posteriormente se llevaron al laboratorio del CIIDIR Sinaloa, para trabajarlas en pequeños fragmentos de hojas con síntomas de las enfermedades.

Aislamientos e identificación de hongos foliares de las plantas de maíz.

Para el aislamiento de los hongos *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis*, localizados en diferentes cultivos de maíces del valle agrícola de Sinaloa se utilizó el método descrito por Manamgoda (2012), donde se cortaron pequeñas partes del tejido foliar infectado (hojas con visible daño de hongo) con algunos tejidos sanos alrededor de la lesión de 0,5 cm × 0,5 cm de diámetro, posteriormente los cortes de hojas se esterilizaron superficialmente con hipoclorito de sodio al 1 % durante 30 segundos con 3 lavados de agua destilada, durante 1 a 2 minutos. Los cortes de hojas se secaron en papel secante estéril, para absorber la humedad y finalmente poderlas colocar en un medio de cultivo PDA frescos para obtener cultivos puros de *E.Turcicum* y *C. zeae-maydis* (Ferdinandez et al., 2020; Navarro et al., 2021).

Establecimiento de cultivo de maíz en invernadero e inoculación con hongos foliares.

Para el desarrollo de esta actividad se obtuvieron plántulas de maíz, utilizando Peat moss comercial en contenedores de un litro bajo condiciones de invernadero, con un rango de temperatura que oscilaba de 25 °C a 35 °C.

Obtención de un cepario *in vivo* de los principales agentes causales de las enfermedades foliares de maíz.

Para la obtención y preparación del inóculo, se obtuvieron hojas primarias infectadas, las cuales se cortaron desde la base y colocaron en bolsas negras de plástico para trasladarlas al laboratorio de agricultura protegida del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Sinaloa, del Instituto Politécnico Nacional. Las hojas infectadas de *Exserohilum turcicum*, se colocaron en cajas Petri con papel absorbente humedecido con agua destilada estéril, a temperatura ambiente a los 5 días, posteriormente la aplicación se realizó sobre la planta de manera que el inóculo se adhiera sobre la hoja, cubriéndolos con una con película plástica adherible, evaluando el desarrollo de la infección (Pineda, 2005). Las hojas infectadas de *Cercospora zeae-maydis*, se colocaron en cajas Petri con papel absorbente humedecido con agua destilada estéril, la aplicación se realizó utilizando trozos de tejido vegetal inoculados con el patógeno asegurándolos con película plástica adherible, (*Pineda*, 2005). A las hojas infectadas de *Puccinia polysora* se les realizó un raspado de las pústulas de las hojas infectadas de *Puccinia polysora*, con una aguja de disección esterilizada para extraer las uredosporas, mismas que fueron inoculadas en las plantas de maíz sanas crecidas de manera controlada (Ortega-Centeno, 2010). Las plantas inoculadas por los tres patógenos, se colocaron en un estante protegido con malla antiáfidos, con una temperatura de 15 a 32 °C y una humedad relativa del 80%.

RESULTADOS

Obtención de plantas de maíz con síntomas de enfermedades foliares.

De manera general, los resultados de este proyecto de investigación, la Figura 1 muestra la presencia de enfermedades foliares ocasionadas por *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis* y *Puccinia polysora*, cuyas enfermedades están presentes de manera muy generalizada en las zonas maiceras de Sinaloa, encontrándose los síntomas foliares en diferentes predios agrícolas.

Figura 1. a) Campo experimental CIIDIR Sinaloa, b) campo agrícola de ranchito de castro, c) campo agrícola Guasave, d) campo agrícola Bachomobampo, e) campo agrícola Cubilete, e) campo agrícola en San Antonio, Guasave, Sinaloa.

Aislamientos e identificación de hongos foliares de las plantas de maíz.

Se obtuvieron aislados de las muestras de hojas de maíz con síntomas foliares de tizón foliar, causada por *Exserohilum turcicum* y mancha foliar por *Cercospora zeae-maydis*. Las muestras fueron seleccionadas de plantas en diferentes etapas de crecimiento y en distintos ambientes geográficos, lo que permitió contar con una diversidad fúngica presente en algunas de las zonas productoras de maíz. Las colonias fúngicas aisladas presentaron características morfológicas que indicaban la presencia de *Exserohilum turcicum* las colonias fúngicas presentaron una estructura densa y algodonosa en su fase inicial, *Cercospora zeae-maydis* presentaron textura algodonosa al principio, que luego se volvieron de color grisáceo a medida que maduraban (Figura 2).
Las muestras fueron seleccionadas de plantas en diferentes etapas de crecimiento y en distintos ambientes geográficos, lo que permitió contar con una diversidad fúngica presente en algunas de las zonas productoras de maíz. Las colonias fúngicas aisladas presentaron características morfológicas que indicaban la presencia de aislamientos correspondientes a *E. turcicum* y *C. zeae-maydis* (Figura 2).

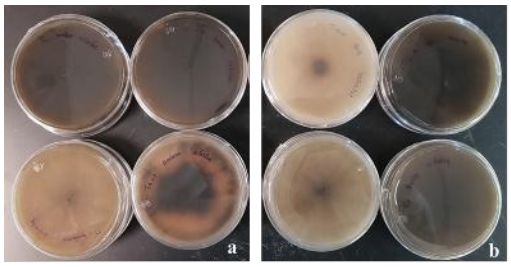


Figura 2*:* Aislados fúngicos: a) C*ercospora zeae-maydis y* b) *Exserohilum turcicum*.

Exserohilum turcicum fue uno de los patógenos más comunes aislados de las muestras. Este hongo es el responsable del tizón de la hoja del maíz, una enfermedad que se caracteriza por la aparición de manchas largas y angostas de color grisáceo o amarillento en las hojas, lo conidióforos presentaron una ramificación distintiva lo que permitió confirmar la presencia de *Exserohilum turcicum*. Otro hongo frecuente aislado fue *Cercospora zeae-maydis* causante de la mancha gris del maíz. Este patógeno produce manchas necróticas de color gris claro o plateado en las hojas, las cuales pueden expandirse rápidamente bajo condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas, microscópicamente las esporas eran de color marrón y de forma alargada, con una estructura conidial de dos a cuatro celdas. El conidióforo era delgado y septado, con una coloración similar a la de los conidios permitiendo confirmar la presencia de *Cercospora zeae-maydis*. Otro de

los hongos identificados de las muestras fue *Puccinia polysora*, este patógeno produce pústulas de color naranja brillante en el envés de las hojas, que contiene esporas amarillas (uredosporas). Las uredosporas eran esféricas o elipsoidales, de color amarillo a anaranjado, con una superficie rugosa. Las uredosporas fueron observadas en grandes cantidades, confirmando la identificación de *Puccinia polysora*. Las infecciones de *Puccinia polysora* se caracterizan por la aparición de estas pústulas que se rompen para liberar esporas las cuales pueden dispersarse rápidamente por el viento (Figura 3).

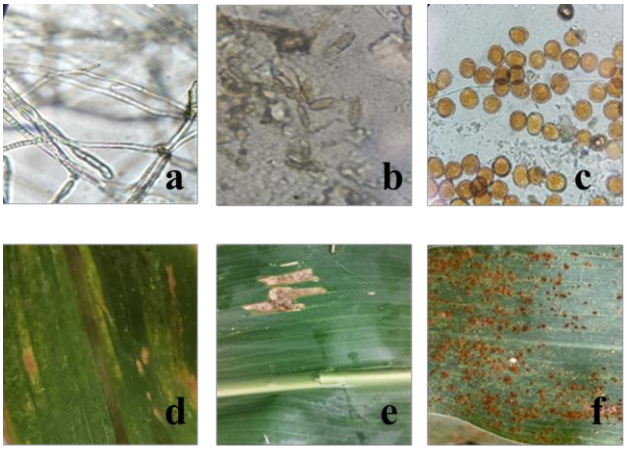


Figura 3. a) Esporas de color marrón claro y de forma alargadas, con conidios de dos a cuatro celdas, *Cercospora zeae-maydis;* b) Conidios de color marrón oscuro, fusiformes de aproximadamente de 30 a 50 micrómetros de largo, *Exserohilum turcicum;* c) Uredosporas esféricas de color amarillo a anaranjado, con superficie rugosa, *Puccinia polysora.* d) Manchas necróticas de color gris claro o plateado de *Cercospora zeae-maydis.* e) Manchas largas y angostas de color grisáceo o amarillento de *Exserohilum turcicum*. f) Pústulas de color naranja brillante de *Puccinia polysora*.

Establecimiento de cultivo de maíz en invernadero e inoculación con hongos foliares.

Se obtuvieron plántulas de maíz, utilizando Peat moss comercial en contenedores de un litro, bajo condiciones de invernadero, con un rango de temperatura que osciló de 25 °C a 35 °C. Éstas fueron inoculadas con *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis* y *Puccinia polysora* a los treinta días después de siembra. Adhiriendo a las plantas trozos de cinco milímetros, de tejido vegetal con el inóculo de cada patógeno, así como con las unedosporas raspadas en el caso de P. polysora (Figura 4).

Figura 4. Inoculación del patógeno en plantas de maíz de 30 días después de siembra.

Obtención de un ceparío *in vivo* de los principales agentes causales de las enfermedades foliares de maíz.

Una vez aislados los hongos, se realizó el proceso de conservación y mantenimiento de cepario *in vivo* de *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis,* el cual consistió en lo siguiente: mantener y evitar la pérdida de viabilidad de las cepas transfiriéndola en cajas Petri con PDA cada 30 días, asegurando que las características morfológicas y la viabilidad de las cepas se mantengan. Así mismo se mantuvieron las plantas de maíz inoculas con los hongos (Figura 5).
En lo que respecta a *Puccinia polysora, el tejido foliar infectado se conserva en microtubos de plástico estériles, almacenados a en refrigeración, para futuras inoculaciones.*

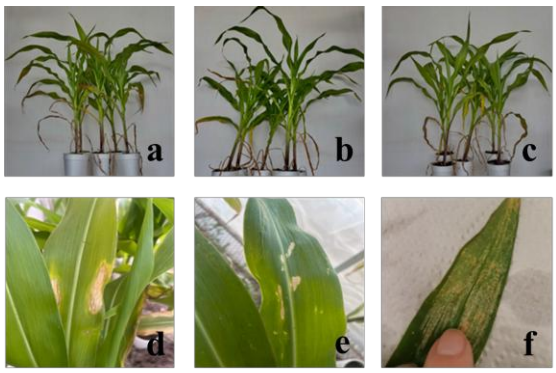


Figura 5. Planta inoculada de maíz: a) *Exserohilum turcicum;* b) *Cercospora zeae-maydis;* c) *Puccinia polysora.* Hojas con síntomas: d) *Exserohilum turcicum;* e) *Cercospora zeae-maydis;* f) *Puccinia polysora*.

En el caso de tizón de la hoja del maíz, se observaron unas manchas largas y angostas en las hojas, con colores que varían entre grisáceo y amarillento. En lo referente a la mancha gris del maíz, se observó la presencia de manchas necróticas de color gris claro o plateado y en las plantas con roya del maíz se presentaron pústulas de color naranja.

CONCLUSIONES

Se alcanzaron los objetivos establecidos para identificar y aislar los agentes causales de las enfermedades foliares más comunes en el maíz, así mismo se logró establecer un cepario o repositorio de patógenos de maíz *in vivo.* El establecimiento de un cepario *in vivo* permitió contar con una colección de *Exserohilum turcicum*, *Cercospora zeae-maydis* y *Puccinia polysora*, que pueden ser utilizadas en futuros estudios. Esto facilita la investigación a largo plazo sobre la interacción entre el maíz y los patógenos, lo que abre la puerta a la creación de cultivos más resistentes y la implementación de estrategias más efectivas de manejo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bigirwa, G.; Julian, A.M.; Adiala, E. (1993) Characterization of Ugandian races of *Exserohilum turcicum* from Maize*. J Afr. Crop Sci.* 1: 69–72.
2. Brewbaker, J.L., Kim, S.K., & Plucknett, D.L. (2011). General Resistance in Maize to Southern Rust (*Puccinia polysora* Underw). *Crop Science*, 51(4):1393–1409. https://doi.org/10.2135/cropsci2010.06.0327
3. Crouch, J.A., & Szabo, L.J. (2011). Real-Time PCR Detection and Discrimination of the Southern and Common Corn Rust Pathogens *Puccinia polysora* and *Puccinia sorghi*. *Plant Disease*, 95(10):1325–1330. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0745
4. De León, C. (1997). Enfermedades del maíz causadas por hongos. Curso Internacional sobre Diagnóstico y Enfermedades en Maíz. Seminario Taller de Cosecha de Maíces de la Zona Andina
5. Ferdinandez, H.S., Manamgoda, D.S., Udayanga, D., Deshappriya, N., Munasinghe, M.L.A.M.S (2020). Morphological and molecular characterization of two graminicolous Exserohilum

species associated with cultivated rice and early barnyard grass from Sri Lanka. *Ceylon J. Sci*. 49: 381–387.
6. Huici R.O. (2007). Fundamentos técnicos para el uso y manejo correctos de plaguicidas. Boletín informativo. PLAGBOL. Bolivia.
7. Kato, T.A., C. Mapes, I.M. Mera, J.A. Serratos, R.A. Bye (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 116 pp. México, D.F.
8. Kotzé, J.M., Flett, B.C., Janse van Rensburg, B., & Aveling, T.A.S. (2019). A histological assessment of the infection strategy of *Exserohilum turcicum* in maize. *Plant Pathology*, *68*(7):1123–1133. https://doi.org/10.1111/ppa.12961
9. Kreis, T. (1996). Speckle metrology. En *Holographic interferometry*, Cap. 4, pp. 125–149. Akademie Verlag.
10. Kumar A., Kumar S., Alzaid S.S., Alkahtan B.S.T., 2022. A novel mechanism to simulate fractional order maize foliar disease dynamical model. Results in Physics 41
11. Leonard, K.J., Levy, Y., Smith D.R. (1989). Proposed nomenclature for pathogenic races of *Exserohilum turcicum* on corn. *Plant Dis.* 73:776-777.
12. Lyimo, H.J.F., Pratt, R.C., & Mnyuku, R.S.O.W. (2013). Infection Process in Resistant and Susceptible Maize (Zea mays L.) Genotypes to *Cercospora zeae-maydis* (Type II). *Plant Protection Science*, 49(1):11–18. https://doi-org.bibliotecaipn.idm.oclc.org/10.17221/57/2011-pps
13. Manamgoda, D.S., Cai, L., McKenzie, E.H.C (2012). A phylogenetic and taxonomic re-evaluation of the Bipolaris, Cochliobolus, Curvularia complex. *Fungal Divers*, 56:131–144.
14. Martínez-Núñez, M.A., González-Hernández, V.A., Silva-Rojas, H.V. & Leyva-Mir, S.G. (2022). Occurrence and distribution of physiological races of *Exserohilum turcicum* in maize-growing regions of Mexico. *Plant Disease*, *106*(3):626–634. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-22-0626-RE.
15. Muiru, G. M., Koenning, S. R., Kelly, H. M., & Kinyua, Z. M. (2010). Characterization of Cercospora zeae-maydis isolates from Kenya. *Plant Disease*, 94(8):1026–1032. https://doi.org/10.1094/PDIS-94-8-1026
16. Navarro, B.L., Ramos-Romero, L., Kistner, M.B. (2021). Assessment of physiological races of *Exserohilum turcicum* isolates from maize in Argentina and Brazil. Trop. *Plant Pathol*, 46:371–380.
17. Ortega-Centeno, S., Guillén-Sánchez, D., Ramos-García, M., Troncoso-Rojas, R., Villanueva-Arce, R., Bosquez-Molina, E., Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2010). Métodos de inoculación y evaluación de extractos botánicos e isotiocianatos de la familia Brasicacea en el control de la roya del gladiolo. Revista Chapingo. Serie horticultura, 16(1):13-21.
18. Passerini, G. Cladosporium paeoniae. In Just's Botanische Jahresberichte; Gebruder Borntraeger: Leipzig, Germany, 1876; Volume 4, p. 235.
19. Pineda, J., Hernández, A., González, A., Barrientos, V., Nass, H., & Gil, E. (2005). Técnica de inoculación rápida y eficiente para la evaluación de materiales de maíz ante *Rhizoctonia solani* kühn. Bioagro, 17(2):93-98.
20. Ponce, J. D. C. M., & Pinela, A. G. M. (2024). Diseño de Diferentes Mezclas Intraespecíficas en Genotipos de Maíz para Reducir los Daños de Plagas y Enfermedades Foliares. Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar, 8(2):7230-7256.
21. Raymundo, A.D.; Hooker, A.L. (1981). Measuring the relationship between northern corn leaf blight and yield losses. *Plant Dis*, 65:325–327.
22. Yang, L., Li, L., Guo, W., Song, Y., Cui, H., Lv, S., Sindhu, L., Men, X., Dong, Z., & Zhu, J. (2024). EIRP model driven by machine learning for predicting the occurrence risk of southern corn rust (*Puccinia polysora* Underw.) in northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *356*. https://doi-org.bibliotecaipn.idm.oclc.org/10.1016/j.agrformet.2024.110149
23. Zhao, Z., Liu, H., Wang, C., & Xu, J.R. (2014). Pathogenicity variation in two genomes of *Cercospora* species causing gray leaf spot in maize. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, *27*(6):607–616. https://doi.org/10.1094/MPMI-06-22-0138-R

EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA DEL 2,4-DINITROFENOL EN *Microcystis Aeruginosa*

Gerardo Solís González[1], Ana D'Ors de Blas[2], Alondra Alelie Cortés Téllez[1], Sebastián Sanchez-Fortún[2] y María Carmen Bartolomé Camacho[1]

[1]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [2]Universidad Complutense de Madrid
carmen.bartolome@umich.mx

RESUMEN

El 2,4-dinitrofenol (2,4-DNP) es un compuesto químico ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y agrícolas, cuya presencia en cuerpos de agua ha generado preocupación por sus posibles efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. En este estudio, se evaluó el impacto del 2,4-DNP sobre *Microcystis aeruginosa*, una cianobacteria con distribución global en ecosistemas de agua dulce y un papel clave en la dinámica ecológica de estos ambientes. Su proliferación descontrolada puede generar floraciones algales nocivas con efectos negativos en la calidad del agua y la biodiversidad. El objetivo de la investigación fue determinar cómo la exposición al 2,4-DNP afecta la supervivencia y el crecimiento de *M. aeruginosa*. Para ello, se realizaron pruebas con concentraciones de 10, 25, 50, 75 y 100 mg L^{-1}, permitiendo el cálculo de la Concentración Inhibitoria del 50% (CI50) y la Concentración No Observada de Efectos (NOEC). El bioensayo siguió la directriz 201 de la OCDE, utilizando cultivos axénicos de M. aeruginosa en medio BG-11 bajo condiciones controladas (24 ± 2 °C, fotoperiodo 12:12 h luz-oscuridad, 40 µmol m^{-2} s^{-1}). Las intoxicaciones se realizaron en tubos de doble cierre de 3 mL, y la inhibición del crecimiento se midió a las 72 horas mediante conteo celular en microscopio óptico con cámara de Neubauer. La CI50 se calculó mediante análisis de regresión lineal, y la NOEC se estableció comparando los tratamientos con el control mediante ANOVA y pruebas de Tukey ($p < 0.05$). Los resultados indicaron una CI50 de 55.23 mg L^{-1}, lo que sugiere que a esta concentración el crecimiento de *M. aeruginosa* se ve significativamente inhibido. Asimismo, se estableció una NOEC de 1.29 mg L^{-1}, indicando que concentraciones inferiores a este umbral no provocaron efectos adversos observables en la cianobacteria. Estos hallazgos son relevantes considerando el uso del 2,4-DNP en la síntesis de pesticidas, herbicidas y productos químicos industriales, los cuales pueden representar un riesgo para los ecosistemas acuáticos al alcanzar concentraciones críticas. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), el 2,4-DNP se clasifica en la categoría III de toxicidad para el ambiente acuático (10-100 mg L^{-1}), lo que reafirma su peligrosidad en este tipo de entornos. En conclusión, los resultados destacan la importancia de *M. aeruginosa* como bioindicador de contaminación por 2,4-DNP, evidenciando su sensibilidad ante este compuesto y su utilidad en estudios ecotoxicológicos. Además, considerando el impacto de esta cianobacteria en la calidad del agua y la salud de los ecosistemas, se refuerza la necesidad de establecer regulaciones eficaces para mitigar los efectos de contaminantes químicos en organismos clave, promoviendo estrategias de manejo sostenible y conservación de los recursos hídricos.

INTRODUCCIÓN

Los nitrofenoles son compuestos intermedios empleados en la producción de fármacos, colorantes, pesticidas, preservantes para madera y explosivos. Su alta reactividad y resistencia a la degradación biológica hacen que los fenoles sean contaminantes frecuentes en los ecosistemas acuáticos, donde pueden persistir y acumularse en los organismos vivos, representando un riesgo para la salud humana (Rüzgar et al., 2023).

El 2,4-dinitrofenol (2,4-DNP) es un tipo de nitrofenol con un uso extendido en la fabricación de sustancias químicas y productos agroindustriales. Sin embargo, su toxicidad es elevada para los seres humanos y otros mamíferos, ya que contribuye a la formación de metahemoglobina e interfiere con la fosforilación oxidativa (Su, 2009; Murillo et al., 2011; Ramos et al., 2024). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) lo clasifica como un contaminante prioritario debido a su persistencia en el ambiente y ha alertado sobre su resurgimiento, facilitado por la venta

en línea como un producto para la reducción de grasa corporal (Gziut y Thomas, 2022). Para evaluar su impacto en los ecosistemas, los bioindicadores, como los organismos del zooplancton, son herramientas valiosas, ya que permiten determinar las concentraciones letales del 2,4-DNP en la cadena alimentaria y ofrecer información sobre la calidad ambiental (Environmental Agency, 2008; Piontek et al., 2023).

La contaminación del agua es una problemática ambiental de gran magnitud que amenaza la salud pública, la fauna y los ecosistemas acuáticos. Este fenómeno es resultado de diversas actividades humanas, entre ellas la urbanización, la agricultura y el desarrollo industrial, que generan una amplia gama de contaminantes. Entre estos se incluyen fertilizantes, pesticidas, productos agroquímicos, desechos domésticos, aguas residuales, aceites, metales pesados, elementos traza, compuestos orgánicos y agentes biológicos contaminantes (Chaudhry y Malik, 2017).

Los contaminantes derivados de la actividad humana y los elementos naturales presentes en los cuerpos de agua pueden interactuar con el material genético de los organismos acuáticos, causando daño celular. La combinación de diferentes sustancias en el agua puede generar efectos sinérgicos peligrosos. Además, se prevé que los cambios en el clima afectarán significativamente los ecosistemas de agua dulce en los próximos años (Zhu et al., 2024).

El cambio climático implica un aumento de la temperatura, variaciones en las condiciones atmosféricas e hidrológicas, así como modificaciones en la distribución de especies. Estas alteraciones afectan la estructura y la composición de las comunidades ribereñas, impactando tanto a las poblaciones de organismos como a sus interacciones ecológicas (Prakash, 2021).

La falta de información detallada sobre los efectos de ciertos contaminantes dificulta la evaluación del riesgo que representan. La monitorización de los parámetros ambientales es clave para detectar la contaminación y predecir sus impactos, y los bioindicadores cumplen un papel fundamental en esta tarea. Estos organismos o comunidades reflejan las condiciones físicas y químicas de un entorno específico y funcionan como señales de alerta temprana ante cambios ambientales, proporcionando una visión del estado de salud de los ecosistemas acuáticos (Bellinger y Sigee, 2015; Skok y Breus, 2021).

El uso de bioindicadores en la evaluación ambiental permite comprender los mecanismos de acción de los contaminantes y sus efectos tóxicos en los seres vivos (Ravera, 2001). La toxicidad de una sustancia solo puede determinarse mediante estudios retrospectivos de casos de intoxicación o experimentos controlados con animales, plantas y microorganismos, conocidos como bioensayos (Repetto, 1988).

Los bioensayos han demostrado ser herramientas eficaces para evaluar los efectos adversos de un compuesto y su impacto en una población y su entorno. Estos ensayos pueden medir la toxicidad de una sustancia de manera aguda o crónica, empleando especies representativas de distintos niveles de la cadena alimentaria. Así, se obtiene una visión general del estado del ecosistema y se pueden extrapolar los resultados a otros niveles tróficos (Baker et al., 2003; Castillo, 2004).

En este estudio, se utilizó como bioindicador la microalga Microcystis aeruginosa, un organismo fotosintético unicelular presente en ambientes hipersalinos. Sus características incluyen una alta tolerancia a la salinidad, la capacidad de acumular grandes cantidades de β-caroteno en respuesta a condiciones extremas y una rápida adaptación a cambios ambientales. Gracias a estas propiedades, M. aeruginosa es un excelente organismo modelo en estudios ecotoxicológicos y de contaminación acuática, permitiendo evaluar el impacto de diversas sustancias sobre los sistemas acuáticos (Ben-Amotz et al., 2009).

TEORÍA

Los nitrofenoles son empleados como elementos intermedios en la fabricación de medicamentos, tintes, pesticidas, conservantes para la madera y explosivos. Debido a su elevada reactividad y

resistencia a la descomposición biológica, los fenoles se convierten en contaminantes habituales en entornos acuáticos, persistiendo y acumulándose en organismos vivos. Esta situación plantea un riesgo para la salud pública. (Rüzgar et al., 2023).

El 2,4-dinitrofenol (2,4-DNP) es un nitrofenol ampliamente utilizado en la fabricación de productos químicos, pero es altamente tóxico para los seres humanos y otros mamíferos debido a su capacidad para formar metahemoglobina y desacoplar la fosforilación oxidativa (Su, 2009; Murillo et al., 2011; Ramos et al., 2024).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) lo considera un contaminante prioritario debido a su persistencia en el ambiente y ha dado su voz de alarma ya que su uso parece estar de nuevo en auge, especialmente gracias a la facilidad de la venta por internet, en donde se distribuye como una sustancia “quema grasa” (Gziut y Thomas, 2022).

Los bioindicadores como el fitoplancton son útiles para determinar las concentraciones letales del DNP en la red trófica, brindando información sobre la calidad ambiental y las condiciones de los organismos y ecosistemas (Environmental Agency, 2008; García et al., 2017; Piontek et al., 2023).

La problemática de la contaminación del agua constituye una seria amenaza para la salud humana, la biota y los ecosistemas acuáticos. Esta situación se atribuye a múltiples actividades humanas, tales como la urbanización, la agricultura y el desarrollo industrial, las cuales generan y emiten diversos contaminantes al medio ambiente. Estos agentes contaminantes abarcan desde fertilizantes, pesticidas, y agroquímicos hasta residuos domésticos, aguas residuales, aceites, metales pesados, elementos traza, compuestos orgánicos y contaminación biológica (Chaudhry y Malik, 2017).

Los elementos naturales y las sustancias contaminantes derivadas de la actividad humana en entornos acuáticos pueden entrelazarse con el material genético de los organismos acuáticos, generando daños celulares. La combinación de diversos contaminantes en el medio acuático puede dar lugar a sinergias peligrosas. Además, se anticipa que las alteraciones en el sistema climático tendrán consecuencias importantes a nivel mundial en los ecosistemas de agua dulce en los próximos años (Zhu et al., 2024).

El cambio climático conlleva un incremento de la temperatura, modificaciones en las condiciones atmosféricas e hidrológicas, así como cambios en la distribución de las especies. Estas transformaciones están perturbando la composición y la distribución de las comunidades ribereñas, impactando tanto en las poblaciones como en las interacciones dentro de los ecosistemas (Prakash, 2021).

La disponibilidad de información sobre los efectos de las sustancias contaminantes es limitada, lo que complica la evaluación del nivel de riesgo. La vigilancia de parámetros ambientales es esencial para supervisar la contaminación y anticipar sus consecuencias, y los bioindicadores juegan un papel crucial en este proceso. Estos son organismos o comunidades que ofrecen datos sobre las condiciones físicas y químicas en un lugar específico. En el contexto de los cambios ambientales, los bioindicadores son considerados como señales de alerta temprana que reflejan el estado "saludable" de un sistema acuático (Bellinger y Sigee, 2015; Skok y Breus, 2021).

Los bioindicadores utilizados en la monitorización ambiental permiten entender los mecanismos de acción de sustancias nocivas y determinar sus efectos tóxicos en los organismos vivos (Ravera, 2001). Los organismos vegetales desempeñan un papel importante en sus hábitats naturales, suministrando oxígeno, controlando el movimiento de materia orgánica y manteniendo el equilibrio biológico del suelo (Manning et al., 2002).

Se emplean cada vez más fitoindicadores, que abarcan algas y cianobacterias, para evaluar la calidad de los ecosistemas, gracias a su sensibilidad a las alteraciones químicas en el entorno y su

capacidad para acumular contaminantes. La composición y funcionamiento del fitoplancton ejerce un impacto significativo en los ciclos biogeoquímicos de elementos como el carbono, nitrógeno y fósforo. El cambio climático está transformando rápidamente la estructura de la comunidad fitoplanctónica, subrayando la urgencia de comprender su reorganización en este contexto (Chandel et al., 2023).

El fitoplancton destaca como un excelente sistema modelo gracias a su tamaño reducido, ciclos de generación breves, elevada abundancia y facilidad de manipulación en entornos de laboratorio (Yusuf, 2020).

Microcystis aeruginosa es una cianobacteria unicelular que forma colonias. Las células individuales son esféricas y se agrupan en colonias irregulares que pueden parecer una masa gelatinosa. Puede formar biofilms en varias superficies acuáticas, incluyendo rocas, plantas y otros organismos acuáticos (Raghavan at al., 2023). Contiene clorofila a, ficocianina y ficoeritrina, que le dan su característico color verdeazulado. Produce toxinas llamadas microcistinas, que son perjudiciales para los animales y los humanos si se ingieren en grandes cantidades. La producción de microcistinas depende de factores ambientales como la temperatura, generalmente temperaturas altas favorecen la producción de toxinas; luz, donde la exposición intensa puede aumentar la producción de microcistinas, mientras que la luz UV puede tener efectos inhibitorios; nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo pueden influir en la producción de microcistinas, así como aguas eutróficas; pH y CO2, un pH alto puede favorecer la proliferación de M. aeruginosa y su producción de toxinas; además de esto, la variabilidad en el genotipo, expresión génica, recombinación y mutación, puede llevar a la variación en la producción de microcistinas entre las diferentes cepas de M. aeruginosa (Song et al., 2023). Las células individuales de Microcystis aeruginosa miden típicamente entre 2 y 7 micrómetros de diámetro. Las colonias pueden ser visibles a simple vista, ya que pueden alcanzar varios milímetros de diámetro.

PARTE EXPERIMENTAL

Sustancia de ensayo
La sustancia de ensayo utilizada fue el 2,4-dinitrofenol con una pureza de 97 % (Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen, Alemania). El compuesto fue disuelto en agua destilada y desionizada. Se trabajó a concentraciones crecientes en un rango de 10 a 100 mg L-1.

Material biológico
El material biológico utilizado fue la microalga M.aeruginosa obtenida de la colección de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, sometidas a un crecimiento axénico en frascos de cultivo (Grainer, Bio-One, Longwood, NJ, USA) con 20 ml de medio de cultivo f/2. Las microalgas se mantienen a 21 °C bajo un ciclo de luz/oscuridad del 50 % y una intensidad de 60 µmol m-2 s-1 en un rango de banda entre 400 y 700 nm.

Determinación de la mortalidad en *M. aeruginosa*
Se procedió a determinar la concentración inhibitoria media (CI50), que es aquella que causa la inhibición de crecimiento del 50 % en 72 horas, mediante intoxicación aguda con el 2,4-DNP, de acuerdo con los parámetros establecidos por la Directriz 201 de la OECD.

Análisis estadístico
Los valores de la CL50 y NOEC fueron obtenidos por regresión lineal a través de la relación Concentración-Respuesta. La prueba de distribución normal de los datos se realizó a través de la prueba D'Agostino-Pearson por el sistema estadístico Graphpad Prism v 7.0 (Graph-Pad Software Inc., USA) basada en el test de normalidad por D'Agostino y Pearson, (1973).

RESULTADOS

Se obtuvo una CI50 de 25.78 mg L-1 y una NOEC de 6.44 mg L-1 del 2,4-DNP sobre M. aeruginosa tras 72 horas de exposición (Tabla 1), lo que lo incluye, de acuerdo con la clasificación para

sustancias tóxicas propuesta por la US-EPA, dentro de la Categoría III como una sustancia moderadamente peligrosa para el ambiente acuático (Tabla 2).

El efecto de la exposición aguda de M. aeruginosa al 2,4-DNP, es una respuesta dependiente de la concentración de la sustancia de ensayo, donde a mayor concentración de la sustancia de ensayo mayor es la respuesta tóxica.

Tabla 2. Valores de la CI50 y 72h-NOEC del 2,4-DNP sobre *M. aeruginosa* tras 72 h de exposición.

Parámetro	[ ] mg L^{-1} (L. C. 95 %)
72h-NOEC	6.44
$CI_{50(72)}$	25.78 (20.25-29.46)
$CI_{100(72)}$	174.90 (134.4-248.55)

Tabla 2. Categorización propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para los contaminantes acuáticos.

CI_{50} mg L^{-1}	Categoría
< 1	I: Sustancia muy tóxica para el ambiente acuático
1 – 10	II: Sustancia tóxica para el ambiente acuático
10 – 100	III: Sustancia ligeramente tóxica para el ambiente acuático
> 100	IV: Sustancia no tóxica para el ambiente acuático

El efecto de la exposición aguda de M. aeruginosa con el 2,4-dinitrofenol resultó en una respuesta ligeramente tóxica sobre este bioindicador tras 72 h de exposición, lo cual se observa en la Ilustración 1, donde es posible apreciar la curva concentración-respuesta, lo cual indica que a mayor concentración del 2,4-DNP sobre M. aeruginosa, mayor es la inhibición de su crecimiento.

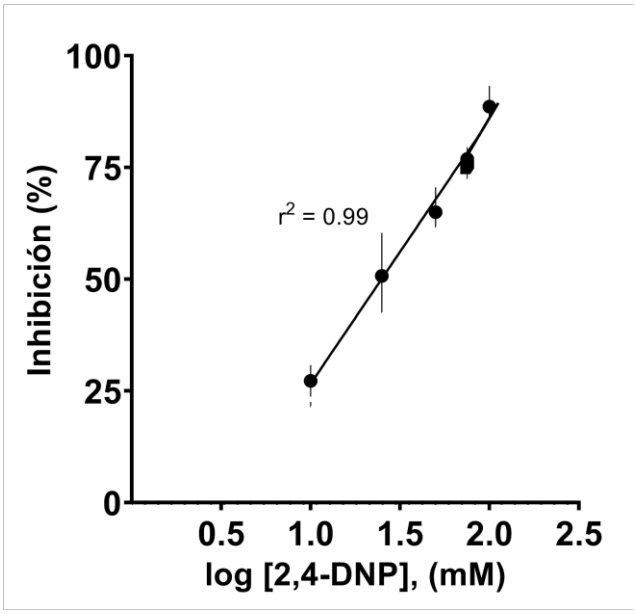


Ilustración 1. Curva concentración-respuesta del efecto tóxico agudo del 2,4-dinitrofenol sobre la microalga *M. aeruginosa*.

Discusión

Los dinitrofenoles son sustancias químicas que no están presentes de manera natural en el entorno. Estas sustancias y similares se utilizan como insecticidas, herbicidas, fungicidas e intermediarios químicos, además de ser utilizadas en explosivos, tintes y productos químicos para la fotografía Dentro de estos, el 2,4-dinitrofenol (DNP) es el más significativo en términos comerciales. (Olson, 2024). Este compuesto presenta una textura sólida, de tonalidad amarilla, no tiene olor y puede ser asimilado por la piel, ingerido o inhalado. En el entorno, los dinitrofenoles pueden encontrarse en el aire, el agua y el suelo, donde tienen la capacidad de llegar a las aguas o desintegrarse. Es sabido que los análisis químicos revelan sustancias nocivas y su concentración, pero no alcanzan a suministrar información acerca de los efectos que causan en los organismos acuáticos. En distintos campos de la ciencia, los bioensayos se emplean para entender las reacciones de los organismos frente a la presencia de una o varias sustancias (Ávila et al., 2018). En ellos se trabaja muy frecuentemente con plancton, el fitoplancton en concreto se considera como un magnífico indicador de las condiciones de los ambientes acuáticos, gracias a su elevada sensibilidad a las variaciones naturales, tanto en aguas continentales como marinas. En este estudio, M. aeruginosa presentó una mayor inhibición del crecimiento poblacional frente al 2,4-DNP en comparación con estudios realizados con este mismo xenobióticos ante el bioindicador Chlorella vulgaris (US-EPA). Estas diferencias pueden atribuirse a factores como la composición celular y las condiciones ambientales en las que estas microalgas se desarrollan.

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), el 2,4-DNP se clasifica como moderadamente tóxico (categoría III), basándose en valores de IC50. Sin embargo, esta categorización se centra en el impacto sobre la reproducción celular y no considera otros aspectos metabólicos, como las alteraciones en la fotosíntesis que podrían indicar afectaciones previas a la inhibición del crecimiento .

El impacto del 2,4-DNP en la fotosíntesis es un aspecto crítico de la toxicidad en microalgas. Se ha documentado que los fenoles y nitrofenoles pueden interferir en la transferencia de electrones en el fotosistema II, reduciendo la eficiencia fotosintética y afectando la producción de oxígeno (Pereira et al., 2009). Estudios recientes han encontrado que el 2,4-DNP puede inducir estrés oxidativo en microalgas, promoviendo la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y afectando la integridad de los cloroplastos (Ghosh et al., 2020).

El método de cuantificación celular, utilizado en numerosos estudios, puede subestimar la toxicidad real del 2,4-DNP en comparación con métodos más sensibles como la medición del balance de oxígeno (Boyd et al., 2001). Mientras que nuestros resultados concuerdan con esta observación, contrastan con estudios como los de Bartolomé et al. (2009), quienes encontraron una menor inhibición del crecimiento en Chlorella vulgaris. Esta discrepancia sugiere que la estructura molecular del tóxico y su interacción con diferentes mecanismos metabólicos pueden generar respuestas biológicas variables según la especie analizada.

La comparación entre *M. aeruginosa* y otros bioindicadores permite ampliar la comprensión del impacto de los nitrofenoles en el fitoplancton. Dado que esta microalga es altamente tolerante a condiciones extremas, su sensibilidad al 2,4-DNP indica que este compuesto puede representar un riesgo significativo para la productividad primaria en ecosistemas acuáticos.

CONCLUSIONES

El 2,4-DNP demostró una toxicidad moderada sobre la microalga Microsytis aeruginosa en el bioensayo de inhibición del crecimiento poblacional. Esto sugiere que la sustancia puede generar daños subyacentes en el organismo bioindicador, como alteraciones en los fotosistemas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ávila Cervantes, R. A., Gabriela, M. M. b., González Pech, P. G., Sandoval Castro, C. A., & Acosta, F. T. (s/f). Bioensayos in vitro de relevancia en las ciencias biológicas y agropecuarias. Uady.mx.
2. Baker, S., Herrchen, M., Kund-Rinke, K., Klein, W., Kördel, W., Peijnenburg, W. & Rensing, C. (2003). Underlying issues including approaches
3. and information needs risk assessment. Ecotoxicology and Environmental Safety 56:6-19.
4. Barata, C., Baird, D. J., & Soares, A. M. V. M. (2001). "Phenotypic plasticity and population differentiation in the ability to detoxify toxic compounds: Daphnia magna Straus exposed to 2,4-dinitrophenol." *Journal of Evolutionary Biology*, 14(4), 411-419.
5. Bellinger, E. G., & Sigee, D. C. (2015). Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators. John Wiley & Sons.
6. Castillo, G. (2004). Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y
7. aplicaciones. IDRC/IMTA. 202 p.
8. Chaudhry, F. N., & Malik, M. F. (2017). Factors affecting water pollution: a review. J. Ecosyst. Ecography, 7(1), 225-231. 10.4172/2157-7625.1000225.
9. D'Agostino, R., Pearson, E. S. (1973). Test for Departure from Normality. Empirical Results for the Distributions of b2 and √ b1. Biometrika 60, 613-622.
10. Gziut, T., & Thomas, S. H. (2022). International trends in systemic human exposures to 2, 4 dinitrophenol reported to poisons centres. *Clinical Toxicology*, *60*(5), 628-631.
11. Murillo, S., Ruiz-Muñoz, J. F., & Vicente, J. A. (2011). Synthesis and applications of nitrophenols. Chemical Society Reviews, 40(5), 2593-2626.
12. Papadopoulus, A., Lazaridou, E., Mauridou, G., & Touraki, M. (2004). Glutathione S-transferase in the branchiopod Artemia salina. Marine Biology, 144(2).
13. Piontek, M., Czyżewska, W., & Mazur-Marzec, H. (2023). Effects of harmful cyanobacteria on drinking water source quality and ecosystems. Toxins, 15(12), 703. https://doi.org/10.3390/toxins15120703.
14. Prakash, S. (2001). Impact of Climate change on Aquatic Ecosystem and its Biodiversity: An overview. International Journal of Biological Innovations, 3(2). https://doi.org/10.46505/IJBI.2021.3210.
15. Ramos, R. L., Moreira, V. R., & Amaral, M. C. S. (2024). Phenolic compounds in water: Review of occurrence, risk, and retention by membrane technology. Journal of Environmental Management, 351, 119772. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119772
16. Ravera, O. (2001). Biomarcadores en toxicología. Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia, 67(3), 589-609.
17. Repetto, M. & Sanz, P. (1988). En *Toxicología fundamental*. Editorial Científico Médicas. 2da edición. 408.
18. Rüzgar, A., Karataş, Y., & Gülcan, M. (2023). Synthesis and characterization of Pd0 nanoparticles supported over hydroxyapatite nanospheres for potential application as a promising catalyst for nitrophenol reduction. Heliyon, 9(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21517
19. Skok, S., & Breus, D. (2021). Bioindication Assessment of Drinking Water Toxicity in Large Cities of Ukraine. http://hdl.handle.net/123456789/7938
20. Su, H. (2009). Removal of nitrophenols from water by adsorption—a review. Journal of Hazardous Materials, 166(1), 1-11.
21. US Environmental Protection Agency (EPA). (n.d.). Nitrophenols (Priority Pollutant). Recuperado de https://www.epa.gov/priority-pollutants-primary-standard-table#nitrophenols.
22. Zhu, M., Wang, J., Zhang, J., & Xing, Z. (2024). Responsibility-sharing and compensation scheme of transboundary water pollution embodied in China's inter-provincial trade: a perspective from economic value capturing. Environmental Science and Pollution Research, 1-12. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31708-w

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE NEJAYOTE EMPLEANDO UN REACTOR UASB

Monica González Castañeda[1], Claudia Palomares Rodríguez[1], Verónica Janette Cedeño Garcidueñas[1], Guillermo Andrade Espinosa[1], Omar Augusto Sánchez Ortiz[1], Alberto Millán Montañez[1]

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Morelia.
claudia.pr@vmorelia.tecnm.mx

RESUMEN

El agua residual generada a partir del proceso de nixtamalización del maíz representa una descarga equivalente al 15% de las descargas residuales totales municipales del país, es decir, 60,000 m^3 de efluente de agua de nejayote es vertido a cuerpos de agua sin previo tratamiento lo que incrementa la contaminación de los cuerpos receptores de esta agua residual que se caracteriza por poseer una elevada demanda química de oxígeno, altos niveles de temperatura, pH y solidos suspendidos totales.

Es por esto por lo que el presente estudio tuvo como objetivo dar tratamiento al agua residual proveniente de la nixtamalización para obtener como subproducto biogás. Para lograr los objetivos del proyecto se construyó un reactor tipo UASB a escala laboratorio con capacidad de 20 L, el cual fue inoculado con excretas de porcinos y bovinos con proporción 1:1.

Se realizó el seguimiento del comportamiento del sistema para lograr una respuesta favorable durante las distintas etapas del tratamiento (arranque, estabilización y operación), empleando los siguientes parámetros de control: pH, alcalinidad, relación alfa, así como la determinación del porcentaje de remoción de DQO.

El sistema operó durante 146 días logrando un porcentaje de remoción de la DQO del 72%, un promedio en el pH de 5.63, alcalinidad de 3,902 mg/L CaCO3, un volumen de gas de 2 litros con un rendimiento de 0.08 m^3 biogás/kg DQO removida.

Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia del reactor UASB para el tratamiento de agua residual proveniente de la industria tortillera (nejayote), obteniendo un porcentaje de remoción de la DQO del 72% y un rendimiento de biogás de 0.08 m^3 de biogás/kg DQO removida, por lo cual se consideró que el sistema es eficaz para la producción de metano.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la supervivencia de todo ser vivo, ya que, se emplea para fines de consumo, cubrir necesidades básicas y actividades dentro de la industria y la agricultura. [25]

En México el agua se distribuye principalmente para uso agropecuario representando el 77% del agua disponible en el país, para uso público el 13% y finalmente para uso industrial el 10%, esta distribución ha provocado inconformidades debido a la carencia de agua por la que pasa la población, [4] a esto se suma la mala distribución del agua en el país, el incremento en la población, lo cual, ha generado un cambio significativo en la calidad y cantidad debido al uso constante del mismo, lo que a su vez impide que las aguas residuales (AR) reciban un tratamiento antes de ser vertidas al alcantarillado, de acuerdo con la ONU el 80% de las aguas residuales son vertidas a lagos, ríos y acuíferos. [33] La industria de las tortillas genera 14.4 millones de m3/año de agua residual y posee parámetros de pH y alcalinidad muy altos generando perdidas de acuíferos a los que llega el AR y la disminución de la vida acuática que los habita. [34]

Por ello es de suma importancia dar un tratamiento que logre remover los contaminantes de las aguas residuales antes de ser vertida al alcantarillado público. Actualmente se han estudiado diferentes métodos que logran remover los contaminantes de las aguas residuales del proceso cocción del maíz. Con el paso del tiempo se ha demostrado que los tratamientos anaerobios han resultado ser los más adecuados para el tratamiento del agua residual con características típicas del nejayote.

NIXTAMALIZACIÓN

El termino nixtamalización se refiere al proceso de calentamiento y remojado de maíz en una solución de cal o ceniza de madera. La palabra nixtamalización proviene del náhuatl nixtli, cenizas, tamalli, masa, este proceso es el que provee las particularidades a la tortilla como el sabor, olor, textura y color, debido a la cocción alcalina que permite la ruptura del aminoácido triptófano en el maíz produciendo el típico sabor y color. [21]

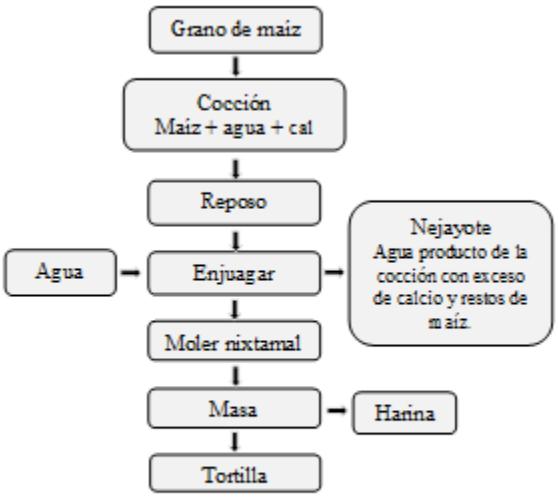


Figura 1. Esquema del proceso de nixtamalización (Elaboración propia).

En el proceso de Nixtamalización se generan dos productos: el grano suave para la elaboración de masa o productos derivados y el agua que se requiere para la cocción del maíz (nejayote).[9]
El nejayote es un efluente que presenta temperaturas altas que van entre 40 a 70°C, alta concentración de materia orgánica disuelta y en suspensión (5 a 50 g/L) y debido al uso de hidróxido de calcio en el proceso contiene un pH alcalino (pH >10). [30][35]

Se estima que cada día se generan de 1.5 a 2 millones de litros de nejayote para el procesamiento de 600 toneladas de maíz. Este efluente se considera altamente contaminante debido a las características que posee (Figura 2), actualmente es vertido sin ningún tipo de tratamiento al alcantarillado público, ríos y lagos generando preocupación por la vida acuática y el deterioro de los cuerpos de agua. [30][34]

Propiedad	*Parámetro*
Contenido total de sólidos (g/L^{-1})	11.68
Sólidos solubles totales (°Brix)	1.53
Carbón orgánico total ($mg \cdot L^{-1}$)	2,984.10
Demanda química de oxígeno ($mg \cdot L^{-1}$)	25,000 – 30,000
Polifenoles totales (mg acido gálico $\cdot L^{-1}$)	1,190
pH	12 – 14
Densidad ($kg.m^{-3}$)	1,003.54
Viscosidad ($Pa \cdot s$)	0.002301
Nitrógeno libre (ppm)	200 – 300
Calcio ($mg \cdot L^{-1}$)	1,526.21
Humedad (%)	97.72
Cenizas (%)	0.767
Proteína cruda (%)	7.42
Grasa cruda (%)	1.48
Fibra cruda (%)	19.3
Carbohidratos (%)	0.862

Figura 2. Propiedades del agua de nejayote. Adaptado de: Acosta-Estrada et al. (2014), Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández (2015), González, Reguera, Figueroa, y Martínez (2003), Salmerón-Alcocer et al. (2003), Valderrama-Bravo et al. (2012) y Velasco-Martínez, Angulo, Vázquez-Couturier, Arroyo-Lara

TRATAMIENTOS PARA AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE NIXTAMALIZACIÓN

Hoy en día se busca desarrollar técnicas innovadoras para el tratamiento del agua residual del nejayote, entre estas; existen tratamientos físicos, químicos y biológicos que pueden ser de ayuda para minimizar la contaminación de los acuíferos.

Dentro de los tratamientos biológicos encontramos el tratamiento aerobio en el cual, los procesos de tratamiento se dan únicamente en presencia de oxígeno y el principal subproducto es biomasa (lodo); y el proceso anaerobio, en el que los procesos de tratamiento solo pueden darse en ausencia de oxígeno y el principal subproducto es el biogás (metano), y en una proporción mucho menor el lodo.[19]

Dado el alto contenido de materia orgánica que contiene el agua de nejayote, la digestión anaerobia resulta ser un tratamiento viable debido a que esta técnica además de ser un proceso estable, económico es fácil de operar, ya que, remueve hasta el 80% de materia orgánica (DQO). [18]

DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno dentro de un reactor completamente sellado. En donde el influente se introduce de forma intermitente o continua en el reactor, este permanece durante periodos de tiempo variables, hasta encontrar una estabilización de los parámetros dentro del tanque. [24] A partir de este proceso se obtiene una suspensión acuosa conocida como "lodo anaerobio", este lodo contiene los microrganismos responsables de la degradación de materia orgánica dentro del tanque, al final de este proceso también se obtiene biogás, el cual; es una mezcla de gases, formado principalmente de metano (50 a 70 %), dióxido de carbono (30 a 50 %) y pequeñas proporciones de otros componentes como; nitrógeno, oxigeno, hidrogeno, etc.

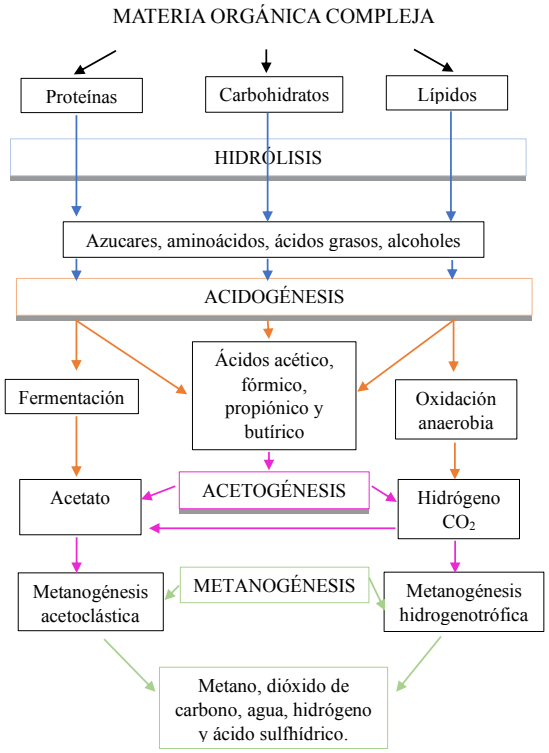


Figura 3. Digestión anaerobia (Elaboración propia).

En el proceso de degradación anaerobia se consideran cuatro etapas, el proceso inicia con la hidrolisis de polisacáridos, proteínas y lípidos por la acción de enzimas extracelulares generadas por bacterias hidrolíticas y fermentativas. Los productos de esta reacción son moléculas de bajo peso molecular como los azucares, aminoácidos, ácidos grasos y alcoholes, los cuales son transportados a través de la membrana celular. Esta fase es relativamente lenta y puede ser la etapa limitante de la digestión anaerobia.

$$(C_6H_{12}O_6)_n + \longrightarrow H_2O\ nC_6H_{12}O_6$$

En el segundo paso (acidogénesis), los productos de la hidrolisis son fermentados a ácidos grasos con bajo número de carbonos como los ácidos acético, fórmico, propiónico y butírico, así como compuestos reducidos con el etanol además de hidrogeno y dióxido de carbono.

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow C_4H_7O_2 + 2HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$$

Dentro de la acidogénesis se producen compuestos que no pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos como el etanol y ácidos grasos volátiles, estos compuestos deben

ser transformados en productos más sencillos como acetato, hidrogeno y dióxido de carbono por la acción de las bacterias acetogénicas, las cuales son conocidas como “bacterias acetogénicas productoras de hidrogeno”.

$$C_4H_7O_2 + 2HCO_3 + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + H_2$$

Finalmente, las bacterias metanogénicas convierten el acetato a metano y dióxido de carbono de dos maneras. La primera vía la realizan las bacterias acetotróficas, las cuales convierten el acetato en metano y dióxido de carbono con una eficiencia del 70%. En la segunda vía, las bacterias hidrogenotróficas convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano y agua, con eficiencia del 30%. [5][37]

Bacterias acetotróficas.

$$HCO_3^- + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 3H_2O$$

Bacterias hidrogenotróficas.

$$2CH_3COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$$

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO ANAEROBIO

Durante la operación continua de un sistema anaerobio, la estabilidad en los parámetros de control permite mantener el adecuado funcionamiento dentro del reactor, por lo tanto, es de vital importancia conocer cualquier cambio en estos para evitar fallas de operación y en caso de ser necesario tomar medidas correctivas. Entre los factores que afecta la operación de los reactores tipo UASB se encuentran:

Temperatura

La temperatura es un factor que afecta significativamente en la digestión anaerobia, ya que el incremento o disminución de este parámetro puede ocasionar desequilibrio en la tasa de crecimiento y en las rutas metabólicas de los microorganismos presentes en el medio. [20][21]
Una temperatura óptima puede ser de gran ayuda para controlar los microrganismos que prevalecerán en el proceso de la digestión anaerobia, así como la velocidad del crecimiento de los mismos y por ende la producción de biogás. Las bacterias capaces de producir biohidrógeno soportan temperaturas que oscilan desde los 15 hasta los 85°C, psicrófilas de los 15 a 20°C, mesófilas de 25 a 40°C, termófilas de 55 a 65°C o hipertermofílas >80°C. [32][31][1]

pH

El reactor debe operar en un intervalo de pH entre 6.2 y 7.8, ya que, valores menores a 5 en el pH afectan el rendimiento metanogénico de los microorganismos, lo que genera una excesiva acumulación de ácidos, provocando la inhibición de las bacterias. [15] Sin embargo, recientes estudios han propuesto que el rango óptimo para lograr una buena producción de biogás está dado entre los valores de 4.5 y 6.5. Cabe mencionar que las bacterias metanogénicas difícilmente toleran valores de pH mayores a 9 o inferiores a 4. [31]

Alcalinidad

La alcalinidad cuantifica la capacidad para neutralizar los ácidos presentes en el medio. Resulta de la presencia de hidróxidos, carbonatos, boratos, silicatos, fosfatos y principalmente bicarbonatos de calcio y magnesio. [2][25]
Una buena digestión dentro del tanque mantiene una alcalinidad de 1000 a 5000 mg/l, sin embargo, algunos autores aseguran que para procesos de digestión anaerobia de aguas residuales

concentradas puede variar entre 12000 a 18000 mg/l sin ocasionar desequilibrios en el sistema. [33] [7]
Se debe monitorear el aumento en la carga orgánica, ya que, ante sobrecargas la actividad de las bacterias acidogénicas es mayor a la de las bacterias metanogénicas lo que provoca la acidificación del reactor. Para evitar que esto ocurra en los reactores anaerobios se debe mantener una óptima capacidad amortiguadora conocida como buffer. [25]

Relación alfa
Un parámetro útil para verificar si la carga orgánica suministrada al digestor es la adecuada y controlar la acumulación de AGV, es la relación alcalinidad/ácidos grasos volátiles.

Jenkins y colaboradores propusieron en 1983 el método Alfa (α) para mantener el monitoreo de la evolución del reactor, definida como:

$$\alpha = \frac{Alcalinidad\ a\ pH\ de\ 5.75}{Alcalinidad\ a\ pH\ de\ 4.3}$$

Relación α se determina mediante un proceso de titulación de una muestra, midiendo el consumo de ácido sulfúrico (H2SO4 0.2N) hasta llegar a un pH de 5.75 y 4.3. Cuanto más cercano a la unidad es el valor de α, el sistema es más estable y se puede proceder al incremento de carga. [3][14]

Composición del sustrato
La composición del sustrato tiene un papel importante en el proceso de los reactores UASB, ya que existe competencia ecológica entre las bacterias metanogénicas y no metanogénicas, por lo que se debe establecer un equilibrio dinámico entre ambas para mantener un sistema eficaz en el tratamiento anaerobio. Los residuos de la industria alimentaria y de las actividades agrícolas en particular, son excelentes sustratos para la digestión anaerobia, por la humedad que los caracteriza y debido a que no contienen contaminantes patógenos, ni metales pesados. [3]

REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASENDENTE UASB

Un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente RAFA, también conocido como reactor UASB por sus siglas en inglés. (Upflock Anaerobic Sludge Blanket) es uncontenedor tubular, cuyo diseño permite mantener en suspensión el agua a tratar, haciendo ingresar un flujo por la parte inferior y hacerlo pasar por un lecho de lodo con el objetivo de generar el contacto necesario con los microorganismos encargados de la degradación anaerobia. El efluente va ascendiendo a través del manto de lodo compuesto de partículas o gránulos biológicos densamente formados; los gránulos de lodo varían de tamaño, de 1 a 3 mm. En la parte media alta del reactor existe una separación física de lodo, líquido y biogás conocidos como Baffles. En la parte superior del tanque se tiene una campana de extracción para capturar el biogás generado durante la degradación anaerobia y finalmente una salida para el fluido tratado (efluente). [13][11][6]

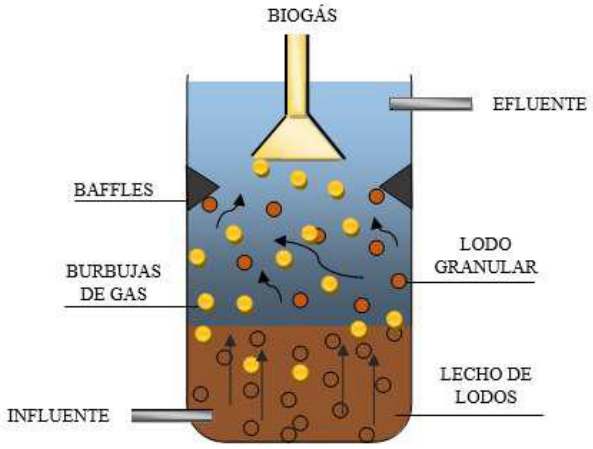


Figura 4. Reactor anaerobio de flujo ascendente UASB.

ETAPAS DEL REACTOR UASB

La tecnología anaeróbica implica tres etapas fundamentales: el arranque, estabilización y la operación del sistema. Estas etapas generalmente se controlan a través del caudal de la carga orgánica, así como la existencia o no de sustancias tóxicas.

Etapa de arranque

La etapa de arranque de un reactor es el periodo durante el cual la biomasa anaerobia se adapta a las caracteristicas del agua residual. El tiempo de esta etapa es muy variado, por lo que no se puede generalizar, dependerá de cada reactor; de las condiciones de alimentación, adaptación del sustrato al inóculo, de los factores ambientales y la calidad constante del efluente.

El arranque de los reactores anaerobios se puede definir como un periodo de transición inicial, marcado por inestabilidades operacionales por lo que se requiere evaluar a diario la calidad del líquido a tratar y del efluente del reactor, pretendiendo iniciar con tiempos de retencion hidrahulicos elevados, para asegurar una buena asimilación del sustrato por parte de las bacterias y mantener una carga orgánica inicial baja, la cual irá incrementando a medida que el reactor se estabilice. [13][27]

Inoculación

La etapa de arranque incluye la selección de inoculo anaerobio, uno de los primeros pasos para realizar un tratamiento biológico de agua residual, de ello depende mantener las condiciones de estabilidad operacional del reactor, ya que la cantidad de inoculo influye en el tiempo de arranque y tipo de granulo formado. En general se recomienda una concentración mínima de 10 kg SSV/m3 y un volumen no mayor del 60% del volumen total del reactor. [13] [29] [12]

La caracterización microbiológica de los lodos permite seleccionar potenciales inóculos y una adaptación al medio anaerobio. Seleccionar un lodo proveniente de fuentes naturales como inóculo resulta ser económico. Las excretas vacunas y porcinan se han utilizado como inóculos debido a que están enriquecidas con diferentes bacterias que juegan un papel importante en el proceso de metanogenesis de la digestión anaerobia. [10][8]
Una vez elegido el inóculo a utilizar para el arranque del reactor, se debe realizar un análisis para su caracterización cualitativa, incluyendo los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV), ST, actividad metanogénica (AME).

Etapa de estabilización

En esta etapa se monitorean y analizan los parámestros de operación del reactor UASB, manteniendo las condiciones ambientales adecuadas. Los sistemas anaerobios son particularmente susceptibles a un control rigoroso de estas condiciones. Para el control de la operación se especifican los siguientes parámetros: Temperatura, Ph, SVT, ST, AGV, alcalinidad, DQO, DBO, producción de biogás, entre otros. [27]

Etapa de operación

La operación del sistema se inicia una vez superada la etapa de arranque, cuando se alcanzan las condiciones de diseño de carga orgánica e hidráulica y la eficiencia de remoción de materia orgánica proyectada. En esta etapa se espera que el reactor funcione en condiciones de estado estables, en el cual las v 3ariables de salida del sistema se mantienen relativamente constantes a pesar de las variaciones temporales en catidad y calidad del efluente. [36]

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene como resultado de la digestión anaerobia de materia orgánica, químicamente el biogás comprende una mezcla de hidrocarburos principalmente; el metano (CH_4) entre un 50 a un 70%, bióxido de carbono (CO_2) en un 29%, sulfuro de hidrógeno (H_2S) en un 0.01%, vapor de agua (H_2O) en un 0.49%. [28]
la producción de biogás depende de la biodegradabilidad del sustrato y de la cantidad de lodo primario atrapado y convertido. [16]

METODOLOGÍA

Se construyó un reactor tipo UASB con capacidad de 20 L, el cual fue inoculado con estiércol porcino y bovino en concentración 1:1. Este inoculo fue caracterizado tomando en cuenta parámetros de pH, alcalinidad, relación alfa, solidos suspendidos volátiles y sólidos totales.

Una vez madurado nuestro inoculo anaerobio, se almacenó y se procedió a alimentar el agua residual (AR) de nixtamalización al reactor, el AR fue caracterizada con parámetros como pH, alcalinidad, sólidos totales, DQO y sólidos sedimentables.
La alimentación del nejayote se realizó de manera paulatina, se comenzó con 2.5 L cada tres días durante dos meses. Pasados los 60 días se hizo un análisis de los parámetros, al obtener un buen resultado de estos se procedió a alimentar la mayor carga volumétrica del reactor (10 L), con un tiempo de retención hidráulico de 48 horas. Manteniendo durante 100 días esta ultima metodología.

Las cargas al reactor se llevaron a cabo con un promedio de 2 horas a una velocidad de flujo de 0.16 litros/minuto, la operación el reactor se llevó a cabo durante 48 días monitoreando el pH y alcalinidad. Finalmente se realizó una caracterización del biogás producido durante el tratamiento, en una bolsa Aldrich se tomó una muestra, la lectura se leyó en un cromatógrafo de gases. Se realizaron lecturas por triplicado, cada una de 300 µL, leyendo metano y dióxido de carbono.

RESULTADOS

Inoculo anaerobio

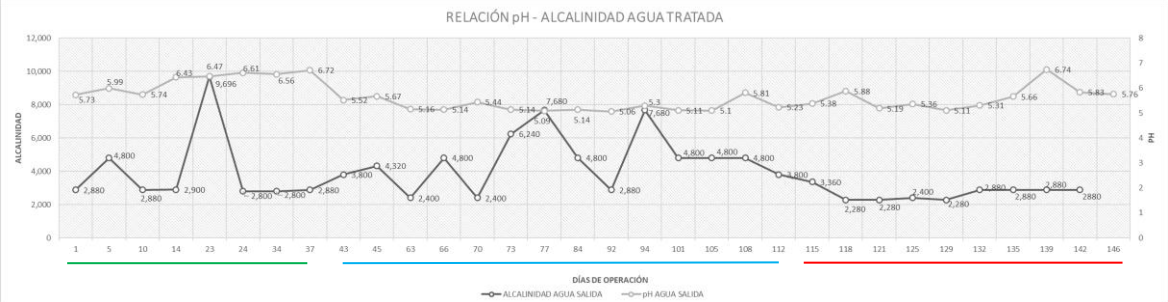
En la tabla numero 1 se muestran los resultados del promedio de los parámetros con que fue caracterizado el inoculo anaerobio, en donde se plasma una comparación con los datos consultados en la bibliografía en donde indica los datos que presenta un inoculo anaerobio adecuado.

En color verde se resaltan los datos del inoculo anaerobio preparado para este tratamiento. Los valores permitieron asegurar las condiciones para una adecuada carga y arranque del reactor, ya que, la adaptación previa del inoculo puede tener influencia en los resultados del tratamiento.[17]

Parámetro	*Fajardo, 1997*	*Valor promedio*
pH	7	6.94
Alcalinidad	1,500 a 5,000 mg $CaCO_3$/L	3,902 mg de $CaCO_3$/L
Relación alfa α	0.5	0.57
Sólidos suspendidos volátiles	>15 mg/L	19,600 mg/L

Tabla 1. Resultados de la caracterización fisicoquímica del inóculo anaerobio.

Caracterización del agua residual



Gráfica 1. Relación pH - Alcalinidad del agua residual.

En la gráfica número 1 se muestra una relación entre los parámetros de pH y alcalinidad del agua residual tomados durante las tres etapas del reactor UASB. En color verde se muestra la etapa de arranque, en donde se mantuvieron datos con mayor estabilidad; el pH, osciló entre 6.43 y 6.72 y la alcalinidad en 2,800 mg $CaCO_3$/L. Lo que permitió confirmar el buen funcionamiento del sistema dentro del reactor, ya que cuando en el sistema el pH cae por debajo de 6.2 puede disminuir la producción de metano debido a la sensibilidad de las bacterias metanogénicas.[38] mientras que la alcalinidad se mantiene en un valor adecuado para asegurar el buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema. [22]

La línea azul indica la etapa de estabilización, en esta etapa se notó una oscilación más amplia entre los datos, en donde fue notorio en algunas mediciones el aumento de alcalinidad, llegando a 7,680 mg de $CaCO_3$/L, Mientras que el pH presentó datos de 5.14. El cambio en los parámetros se atribuye al aumento de la carga orgánica a la que fue sometida el reactor, ya que se incrementó el volumen de agua de nejayote y el tiempo de retención hidráulico, generando un cambio en estos. Sin embargo, en las mediciones posteriores se obtuvieron datos más estables lo que permitió pasar a la etapa de operación resaltada con línea roja en donde se obtuvo alcalinidades de 2,280 a 2,880mg $CaCO_3$/L y pH de 5.19 a 6.7.

En la siguiente tabla se plasma una comparación de los resultados de la caracterización entre el agua de nejayote, el agua tratada y la NOM-001-SEMARNAT-2021 Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores

propiedad de la nación. Destacando el buen funcionamiento para este tipo de tratamientos anaerobios.

Parámetro	*Nejayote*	*Agua tratada*	*NOM-001-SEMARNAT-2021*
pH	12	5.6	6 a 9
Alcalinidad	4,409 mg $CaCO_3$/L	3,902 mg $CaCO_3$/L	NA
Temperatura	26.5	22.7	35
DQO	16,539 mg/L	4,204 mg/L	200 mg/L
Sólidos sedimentables	275 ml/L	15 ml/L	10 ml/L
Sólidos totales	2,326 mg/L	2,647 mg/L	60 a 72 mg/L
TRH	---	48 h	---

Tabla 2. Comparación resultados del agua de nejayo y agua tratada.

Porcentaje de remoción de DQO

La grafica 2 permite conocer el porcentaje de remoción que se obtuvo durante la estabilización y operación del reactor anaerobio obteniendo un porcentaje de 91.5 como mayor remoción durante los primeros días de la estabilización. Posteriormente se obtuvo datos menores obteniendo como mínimo 25.89 %, estos resultados se pudieron ver afectados por el aumento del tiempo de retención hidráulico y el volumen cargado al tanque. Sin embargo, el reactor se estabilizó en los días posteriores logrando un 83% de remoción, indicando el buen funcionamiento del sistema al adaptarse a los cambios a los que se sometió el reactor.

Gráfica 2. Porcentaje de remoción de DQO

Producción de biogás

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de las tres muestras, se desglosa el volumen de biogás tomado en cada muestra, el área de los dos gases tomados en cuenta para la caracterización (HC_4 y CO_2) y la concentración en porcentaje de cada uno.

los resultados de las tres muestras indican un promedio de 66.17 % de metano, lo que se espera encontrar en reactores anaerobios que producen entre 55% y 70% de metano, 30%-50% de dióxido de carbono y otros gases como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y amoníaco.

Volumen de muestra (µL)		***Área***	***Concentración %***
300	Metano	532.5072	66.359
	CO_2	359.5905	33.640
Volumen de muestra (µL)		***Área***	***Concentración %***
300	Metano	576.9349	65.815
	CO_2	399.21	34.184
Volumen de muestra (µL)		***Área***	***Concentración %***
300	Metano	729.043	66.340
	CO_2	493.003	33.659

Tabla 3. Resultados de las muestras tomadas para la caracterización de biogás.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran la eficiencia del rector UASB para tratar aguas residuales provenientes de la industria tortillera (nejayote), se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO del 72%, así como una producción de biogás de 2.5 L con un contenido de metano del 66.17% lo que permite concluir que un sistema biológico de tipo anaerobio es idóneo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la nixtamalización del maíz, así como para la generación de biogás.

Las características del inoculo anaerobio utilizado contribuyó considerablemente para la estabilización del reactor UASB, ya que los días reportados en la literatura consideran una de las etapas más tardadas de los reactores, logrando 118 días de estabilización.

El reactor UASB amortiguó los cambios en la carga orgánica alimentada sin presentar acidificación, debido a la alta concentración de alcalinidad que posee el agua de nejayote.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bahena Hernández, J. A. (2007). Arranque de un digestor de lodos a nivel piloto basado en el concepto de lecho de lodos. Universidad nacional autónoma de México.
2. Caicedo, M. F. y Marín A. J. 2006. Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados. Tesis de especialidad (Especialización en Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional deColombia. Manizales, Colombia. 49 pp.
3. Cajicas, C. A., Pérez V. A. y Torres L. P. 2005. Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Scientia et Technica Año XI. (27):243-248.
4. Carabias, J., Landa R.; Collado J. y Martínez P. (2005). Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México.http://www.bibliotecavirtual.info/recursos/agua_medio_ambiente_y_sociedad.pdf.

5. Crites, Tchobanoglus. 2004. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Mc Graw Hill, pp. 445-454.
6. Chinnaraj, S., & Rao, G. V. (2006). Implementation of an UASB anaerobic digester at bagasse-based pulp and paper industry. Biomass and Bioenergy, 30(3), 273-277.
7. Diez, M., Bornhardt, C., Scheenstein G. 2002. Puesta en marcha y operación de una planta anaerobia-aerobia a escala de laboratorio para el tratamiento de RILes de la industria cervecera. Tesis de grado (Ingeniero Químico). Universidad de la Frontera. 89 pp.
8. Domínguez M., Domínguez F.J. y Almeida M. P. 2006. Influencia de los inóculos en el arranque de la digestión anaerobia. Tratamiento de aguas residuales. Ingeniería química. Matanzas, Cuba. 114-120.
9. Figueroa, J.D.C. 2010. La ciencia, el desarrollo tecnológico y la innovación en Querétaro. Historia, realidad y proyecciones. Maíz y tortilla: alimento, cultura y tradición de México. Aportaciones queretanas a su modernización. CINVESTAV-Querétaro. 30 p.
10. GUYOT, J.P. (1993). "Anaerobic microbial counts of different potential anaerobic inocule". Applied Microbiology, 40: 139-142.
11. Flores, C. (2008). Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia. Tesis de grado (Maestro en ciencias y tecnología en la especialidad de Ingeniería ambiental). CIDETEQ. 40pp.
12. Hulshoff Pol, L. (1987). Arranque y operación de reactores UASB. In Arranque y Operacion de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo-UASBManual del Curso (pp. 1-11).
13. Jacuinde, J. (2018). Determinación del tamaño de gránulo en función del tiempo de envejecimiento del lodo anaerobio en un reactor UASB. Tesis de grado (Maestro en ciencias en Ingeniería Química). UMSNH. 26pp.
14. Jenkins, S., Morgan, J., y otros (1983). Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration. Journal of Water Pollution 55:448-453.
15. JUAREZ, C. R. F. (2008). Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia. CENTRO.

ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA (AgNP´s) A PARTIR DE ROMERO PARA SU APLICACIÓN EN CULTIVOS IMPREGNADOS CON *Xanthomonas Arboricola Pruni*

Sofía Valentina Calvillo Beltrán [1], Karelia Liliana Rangel Ruíz[1], Ivan Arroyo Ordoñez [1] y Jorge Alberto Granados Olvera[1]

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli
1322202006@upci.edu.mx

RESUMEN

La *Xanthomonas arboricola pruni* es una bacteria fitopatógena que afecta cultivos frutales como durazno, chabacano, ciruelo y almendro, provocando importantes daños en la producción agrícola. Los tratamientos convencionales, como el uso de bactericidas, antibióticos y compuestos cúpricos han ocasionado resistencia bacteriana y contaminación ambiental. Debido a esto, las nanopartículas de plata (AgNP's) fabricadas mediante la síntesis verde representan una alternativa prometedora debido a su actividad antimicrobiana y menor impacto ambiental.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la actividad antimicrobiana de AgNP's sintetizadas a partir de un extracto de romero (*Rosmarinus officinalis*) contra *X. arboricola pruni*, en cultivos frutales de chabacano (*Prunus armeniaca*) por medio de diferentes metodologías y parámetros.

Tras la síntesis y caracterización de AgNP´s se recolectaron hojas infectadas en huertos frutales y se procesaron empleando técnicas de aislamiento y siembra en medios de cultivo. Posteriormente se realizaron pruebas de purificación y patogenicidad con respecto a la bacteria para garantizar las condiciones de esta y poder emplear antibiogramas y pruebas microbianas, buscando evaluar la efectividad de las AgNP´s en la erradicación de la bacteria de los cultivos. Para la evaluación antimicrobiana se realizó la prueba de Kirby-Bauer usando diferentes concentraciones de AgNP´s en los discos para medir los halos de inhibición en comparación con los halos de tratamientos convencionales como el bactericida comercial Foley. Tras este análisis, se determinó la menor concentración capaz de inhibir y matar a la bacteria mediante ensayos en caldo nutritivo y resiembra en agar. Posteriormente se realizaron distintas tinciones para evaluar cambios morfológicos en *X. arboricola* tras el tratamiento con AgNP´s. Una vez realizadas las diferentes pruebas en el laboratorio, se aplicaron las AgNP´s sobre algunas hojas infectadas recolectadas de los huertos, midiendo los parámetros de crecimiento o inhibición en estas.

Los resultados de los halos de inhibición fueron significativamente mayores en los discos impregnados con AgNP´s en comparación con los tratamientos convencionales como los pesticidas. Por su parte, que en las pruebas de patogenicidad no se observaron efectos adversos en el crecimiento de las plantas, o su desarrollo. Mientras que las plantas infectadas mostraron una óptima recuperación tras su tratamiento.

Las AgNP´s sintetizadas a partir de extracto de romero demostraron una potente actividad antimicrobiana contra *X. arboricola pruni*, superando en eficacia a tratamientos convencionales. La síntesis verde permitió obtener nanopartículas con excelente estabilidad y biocompatibilidad, reduciendo el impacto ambiental y eliminando la necesidad de productos químicos agresivos; favoreciendo la calidad de frutos para el consumo de la población y evitando tener que talar los huertos frutales impregnados de plaga debido a su resistencia a los métodos convencionales.

INTRODUCCIÓN

Los cultivos de frutales de hueso, como el chabacano (*Prunus armeniaca*), representan un importante sector agrícola en diversas regiones del mundo, tanto por su valor económico como por

su papel en la seguridad alimentaria. No obstante, la producción de estas especies se ve amenazada por diversos factores bióticos, entre los que destacan las enfermedades bacterianas. Una de las patologías más destructivas es la provocada por la bacteria fitopatógena *Xanthomonas arboricola pruni*, causante del cáncer o mancha bacteriana. Esta enfermedad afecta significativamente la calidad y cantidad de la producción, generando lesiones en hojas, frutos y ramas, necrosis, defoliación temprana y en casos graves, la muerte del árbol (Palacio-Bielsa et al., 2010; Lamichhane et al., 2014).

La dispersión de *X. arboricola pruni* ocurre principalmente a través de gotas de lluvia, viento, herramientas agrícolas contaminadas y material vegetal infectado. El patógeno puede sobrevivir en las yemas y en los restos de poda, lo cual complica su erradicación. Además, su elevada capacidad de adaptación y persistencia ha representado un reto constante para el manejo fitosanitario (Ritchie, 1995; EPPO, 2020). El control de esta bacteria se ha basado históricamente en la aplicación de productos fitosanitarios como antibióticos (estreptomicina y oxitetraciclina) y sales cúpricas. Sin embargo, estas estrategias no solo han demostrado ser insuficientes en condiciones de alta presión de inóculo, sino que además han contribuido al desarrollo de resistencia bacteriana, disminuyendo su efectividad a largo plazo (Stockwell & Duffy, 2012).

El uso prolongado e indiscriminado de antibióticos en la agricultura ha generado una alarma global debido a la posible transferencia de genes de resistencia a bacterias humanas y al impacto negativo sobre la microbiota del suelo (Sundin & Wang, 2018). Asimismo, los compuestos cúpricos, aunque comúnmente utilizados como bactericidas de amplio espectro, se han asociado con efectos tóxicos en plantas, acumulación en el ambiente y alteraciones en la biota edáfica (Lamichhane et al., 2018). Ante este panorama, se ha intensificado la búsqueda de soluciones innovadoras, efectivas y ambientalmente sostenibles, entre las que destacan las aplicaciones de nanotecnología en la agricultura.

En particular, las nanopartículas de plata (AgNPs) han despertado gran interés por su potente actividad antimicrobiana y su versatilidad de aplicación. Las AgNPs pueden interactuar con estructuras bacterianas fundamentales, como la membrana citoplasmática, proteínas enzimáticas y material genético, provocando daños irreversibles que conducen a la muerte celular (Rai et al., 2009; Morones et al., 2005). A diferencia de los antibióticos convencionales, las AgNPs actúan mediante mecanismos múltiples y simultáneos, lo cual reduce significativamente la probabilidad de generar resistencia bacteriana.

Sin embargo, muchas de las técnicas tradicionales para la síntesis de AgNPs involucran el uso de reactivos químicos peligrosos, como borohidruros o citratos metálicos, que representan un riesgo ambiental y de salud humana (Iravani et al., 2011). En respuesta a esta problemática, ha emergido la síntesis verde como una metodología alternativa más segura y sostenible. Esta técnica utiliza extractos vegetales ricos en metabolitos secundarios como agentes reductores y estabilizantes en la formación de nanopartículas metálicas. Además de ser una opción ambientalmente benigna, la síntesis verde permite obtener nanopartículas con una mayor biocompatibilidad y estabilidad coloidal.

Dentro del amplio repertorio vegetal empleado para la síntesis verde, el *Rosmarinus officinalis* (romero) ha mostrado un notable potencial debido a su alto contenido en compuestos bioactivos como ácido carnósico, carnosol, rosmarínico, flavonoides y aceites esenciales con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Estos compuestos no solo favorecen la reducción del ion plata (Ag^{+}) a su forma metálica (Ag^{0}), sino que también actúan como agentes estabilizantes que previenen la agregación de las nanopartículas, mejorando su funcionalidad en aplicaciones biológicas.

Estudios previos han demostrado la efectividad de las AgNPs sintetizadas con extractos de romero frente a bacterias patógenas como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*, lo cual respalda su uso potencial en el ámbito agrícola (Shaik et al., 2018; Bhuyar et al., 2020). No obstante, son escasas las investigaciones que han explorado su aplicación contra

patógenos vegetales específicos como *X. arboricola pruni*, especialmente en condiciones reales de campo o semicampo.

Los resultados de esta investigación permitirán establecer la viabilidad de las AgNPs verdes como una herramienta innovadora para el manejo integrado de enfermedades bacterianas en frutales. Además, podrían sentar las bases para el desarrollo de productos bio-nano formulados con aplicaciones agrícolas, que sean efectivos, económicos y ambientalmente seguros. En un contexto global donde se busca la sostenibilidad agrícola y la reducción del uso de agroquímicos, este tipo de soluciones representa una contribución significativa hacia sistemas de producción más resilientes y saludables; manteniendo un equilibrio adecuado.

TEORÍA

Xanthomonas arboricola pruni es una bacteria fitopatógena aerobia gramnegativa, oxidasa negativa que infecta árboles frutales del género *Prunus*, particularmente el chabacano (*Prunus armeniaca*). Pertenece a la familia *Xanthomonadaceae* y a la familia *Xanthomonadaceae*. Su morfología es bacilar, con flagelos que le confieren movilidad, y posee una pared celular rica en lipopolisacáridos. Se caracteriza por formar colonias amarillo-mucosas en medios de cultivo como el agar nutritivo y agar YDC (Yeast Dextrose Calcium Carbonate), lo cual facilita su identificación preliminar. Se desarrolla óptimamente a temperaturas de 25 a 30 °C y coloniza tejidos vegetales, principalmente hojas y frutos, en los que provoca lesiones circulares, aceitosas y necróticas que evolucionan a chancros o exudaciones gomosas. Su genoma contiene genes clave de virulencia agrupados en sistemas de secreción tipo III (T3SS), con efectores (T3Es) como AvrBs2, XopQ, XopN y XopF1, los cuales interfieren con los mecanismos de defensa de la planta huésped.

Su mecanismo de infección incluye la entrada a través de estomas o heridas naturales, estableciendo colonias en el tejido parenquimatoso, donde se establece. Posteriormente produce una serie de compuestos extracelulares como exopolisacáridos (como xantano) y enzimas degradadoras de la pared celular vegetal como como celulasas, proteasas y lipasas, que permiten su invasión y propagación. Asimismo, el biofilm bacteriano contribuye a la persistencia de la infección, especialmente en ambientes húmedos. Esta especie puede sobrevivir epifíticamente en tejidos superficiales, lo que complica su erradicación mediante métodos convencionales. A nivel genético, cuenta con un sistema de secreción tipo III que introduce proteínas efectoras en la célula vegetal para interferir con su inmunidad.

Este patógeno está listado como de importancia cuarentenaria en diversas regiones debido a su potencial para establecerse en nuevas zonas productoras de frutales. El control químico ha demostrado eficacia limitada, y el uso indiscriminado de antibióticos ha generado resistencia, lo que exige alternativas sostenibles.

El chabacano (*Prunus armeniaca*) es una especie frutal de clima templado que pertenece a la familia *Rosaceae*. Se cultiva extensamente por su fruto dulce y aromático, rico en vitaminas A y C, antioxidantes y compuestos fenólicos. Desde el punto de vista fisiológico, el chabacano presenta una fase de latencia invernal y florece temprano en primavera, lo que lo hace susceptible a heladas tardías y ataques tempranos de patógenos.

Agronómicamente, el chabacano es una especie exigente en términos de suelo (prefiere suelos francos, profundos y bien drenados) y manejo hídrico. Los cultivos de chabacano tienen un valor económico considerable en países como Turquía, Irán, España, Italia y México, siendo también una fuente de empleo rural y exportación.

La vulnerabilidad del chabacano a enfermedades bacterianas como la mancha causada por *X. arboricola pruni* radica en la sensibilidad de sus tejidos jóvenes, su floración precoz y la limitada disponibilidad de variedades resistentes. La falta de soluciones eficaces ha incentivado la búsqueda de estrategias innovadoras como el uso de nanotecnología.

La interacción patógeno-huésped entre *X. arboricola pruni* y el chabacano representa un desafío complejo donde confluyen aspectos moleculares, agronómicos y ambientales. La patogenicidad del microorganismo afecta directamente la fisiología del árbol, interfiriendo con la fotosíntesis (por pérdida de área foliar), el transporte vascular (por necrosis de ramas jóvenes) y la calidad de los frutos (por lesiones y pudrición). Estas afecciones repercuten en la productividad del cultivo y en la rentabilidad del productor, especialmente en sistemas frutícolas donde la exportación exige estándares sanitarios estrictos.

Por su parte, las nanopartículas (NPs) se definen como materiales con al menos una dimensión inferior a 100 nanómetros. Esta escala les otorga propiedades únicas como una mayor relación superficie-volumen, reactividad química aumentada y capacidad de penetración celular. Según su composición, pueden ser metálicas, poliméricas, lipídicas o de óxidos metálicos.

Las nanopartículas metálicas, como las de plata (AgNPs), han sido ampliamente investigadas por su efecto antimicrobiano. Estas partículas actúan sobre las bacterias a través de múltiples mecanismos:

- **Interacción con membranas**: Desestabilizan la bicapa lipídica provocando fugas de contenido celular.
- **Generación de estrés oxidativo:** Inducen especies reactivas de oxígeno que dañan el ADN, proteínas y lípidos.
- **Alteración metabólica:** Inhiben enzimas claves y procesos de replicación del ADN.
- **Efecto sinérgico:** En combinación con compuestos vegetales, su actividad puede potenciarse.

Las AgNPs se destacan por su alta eficacia contra bacterias gramnegativas y grampositivas. Se sintetizan comúnmente por métodos químicos, físicos o verdes, siendo estos últimos preferidos por su bajo impacto ambiental. Las propiedades fisicoquímicas como tamaño, forma, distribución y carga superficial influyen directamente en su bioactividad.

En aplicaciones agrícolas, las AgNPs han demostrado capacidad para controlar patógenos en diversos cultivos sin dañar significativamente los tejidos vegetales, si se usan en dosis adecuadas. A diferencia de antibióticos o fungicidas sintéticos, las AgNPs no generan residuos persistentes ni residuos tóxicos en el suelo o en los frutos.

Diversos estudios han evidenciado que AgNPs inhiben eficazmente a bacterias como *Ralstonia solanacearum*, *Erwinia amylovora*, *Clavibacter michiganensis* y *Xanthomonas spp.*. Además, su formulación en aerosoles o recubrimientos foliares facilita su aplicación directa en los tejidos infectados.

El romero (*Rosmarinus officinalis*) es una planta perenne de la familia *Lamiaceae*, ampliamente distribuida en la región mediterránea. Se ha utilizado tradicionalmente por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Su potencial para la síntesis verde de nanopartículas se debe a su riqueza en metabolitos con capacidad reductora y estabilizante.

Los principales compuestos responsables de estos efectos son:

- **Ácido rosmarínico**: potente antioxidante, capaz de reducir iones metálicos y conferir actividad antimicrobiana.
- **Ácido carnósico y carnosol**: diterpenos fenólicos con actividad bactericida comprobada.
- **Flavonoides y terpenos**: como luteolina, quercetina y cineol, que contribuyen tanto a la formación como a la estabilidad de las nanopartículas.

Estos metabolitos actúan como agentes reductores en la conversión de Ag^{+} a Ag^{0}, y al mismo tiempo recubren las nanopartículas, aumentando su estabilidad coloidal y su compatibilidad con tejidos vegetales.

La integración de AgNPs sintetizadas con extracto de romero representa una estrategia biotecnológica prometedora para el control de *X. arboricola pruni* en chabacano. La sinergia entre los efectos antimicrobianos de la plata y los compuestos fenólicos del romero puede traducirse en una mayor eficiencia inhibitoria frente a patógenos bacterianos.

Además, este enfoque se alinea con los principios de agricultura sostenible, al reducir la dependencia de compuestos químicos sintéticos y disminuir el impacto ambiental. La aplicación tópica en hojas y frutos del chabacano puede prevenir la colonización bacteriana, mientras que el bajo riesgo de toxicidad vegetal favorece su implementación a escala agrícola.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis y caracterización de nanopartículas de plata (AgNPs)

La síntesis de las nanopartículas de plata se realizó mediante un método verde utilizando extracto de hojas de *Rosmarinus officinalis* (romero). Para ello, se recolectaron hojas frescas, se lavaron con agua destilada y se secaron a la sombra durante 5 días. Posteriormente, se trituraron hasta obtener un polvo fino. Se preparó una infusión utilizando el polvo vegetal y agua destilada, la cual fue calentada a 60 °C durante 15 minutos y luego filtrada con papel filtro.

Figura 1. Trituración del romero

Figura 27. Filtración de la infusión

La solución filtrada se utilizó como agente reductor y estabilizante para sintetizar las AgNPs. Se mezcló parte del extracto, por medio de goteo con una solución acuosa de nitrato de plata ($AgNO_3$) al 0.1 M. La mezcla se agitó continuamente a temperatura ambiente hasta observar un cambio de color amarillo marrón, indicativo de la formación de nanopartículas. La caracterización de las AgNPs se realizó mediante espectroscopía UV-Vis para confirmar la formación del pico de plasmones superficiales y para confirmar la presencia de plata en las nanopartículas.

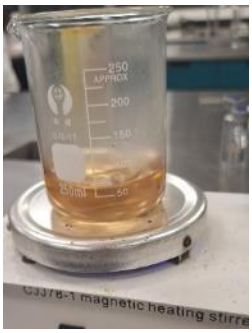


Figura 3. Solución con AgNPs

Figura 4. UV-Vis de AgNPs

Recolección, aislamiento y purificación de la bacteria

Se recolectaron hojas con síntomas típicos de infección por *Xanthomonas arboricola pruni* en cultivos de chabacano (*Prunus armeniaca*). En condiciones estériles, se seleccionaron fragmentos de tejido vegetal sintomático que fueron desinfectados superficialmente con alcohol al 70% por 30 segundos, seguidos por un enjuague con agua destilada. Los tejidos se maceraron en una solución salina (NaCl) y se sembraron en medio de cultivo nutritivo (Nutrient Agar) y medio específico para *Xanthomonas*. Las placas se incubaron a 28 °C durante 48 horas. Las colonias características

(amarillos mucoides) fueron seleccionadas, purificadas por subcultivos sucesivos y conservadas en medio agar inclinado para su posterior identificación.

Figura 5. Desinfección del tejido vegetal

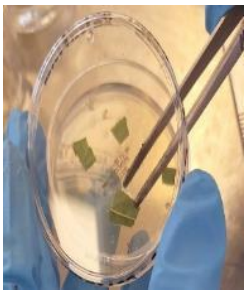


Figura 6. Subcultivo de la bacteria

Figura 7. Conservación de la bacteria

Pruebas de infección

Se realizaron pruebas de patogenicidad para confirmar que los aislados eran efectivamente *X. arboricola pruni*. Frutos sanos de chabacano, papa y jitomate se inocularon con una suspensión bacteriana ajustada. La inoculación se llevó a cabo mediante infiltración foliar utilizando una jeringa sin aguja. Los frutos fueron mantenidas en condiciones de humedad relativa alta y temperatura controlada (25–28 °C) durante 10 días. Se monitorearon los síntomas y se volvió a aislar la bacteria del tejido infectado.

Figura 8. Desinfección de frutos

Figura 9. Inoculación de frutos

Evaluación antimicrobiana de AgNPs

La evaluación de la actividad antimicrobiana se realizó utilizando el método de difusión en agar (pozos o discos). Se sembraron las bacterias aisladas en medio Mueller-Hinton, y se aplicaron distintas concentraciones de AgNPs, Foley y un Bactericida para el tratamiento de *Xanthomona* (50 y 100 µg/mL). Las placas se incubaron a 28 °C por 24-48 horas y se midieron los halos de inhibición con una regla milimétrica. Se utilizó como control negativo el extracto vegetal sin nanopartículas y como control positivo un antibiótico estándar como estreptomicina.

Figura 10. Prueba de difusión

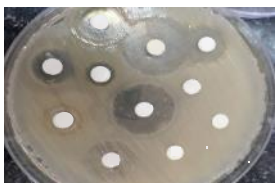


Figura 11. Halos de inhibición

Determinación de la Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) y la Concentración Bactericida Mínima (CBM)

La CMI se definió como la menor concentración en la cual no se observó crecimiento bacteriano (ausencia de turbidez). Posteriormente, para la CBM, se sembraron alícuotas de los pozos sin crecimiento en placas con agar y se incubaron. La CBM se definió como la menor concentración en la que no se recuperó crecimiento bacteriano viable.

Evaluación de los frutos de chabacano tratados con AgNPs

Una vez determinada la concentración efectiva de AgNPs, se procedió a evaluar su impacto en frutos de *Prunus armeniaca* (chabacano) previamente infectados con *Xanthomonas arboricola pruni*. Para ello, se seleccionaron frutos en estado de madurez intermedia, uniformes en tamaño, color y sin daños visibles. Los frutos se desinfectaron superficialmente con hipoclorito de sodio al 1% durante 2 minutos, se enjuagaron con agua destilada y se secaron al aire en condiciones estériles.

Posteriormente, los frutos fueron artificialmente inoculados con una suspensión bacteriana mediante punción con aguja estéril. Luego de un periodo de incubación de 24 horas a 25 °C y 90% de humedad relativa para permitir el establecimiento de la infección, los frutos fueron tratados mediante pulverización con diferentes concentraciones de AgNPs (50 y 100 µg/mL), asegurando una cobertura uniforme. Se incluyó un grupo control negativo (sin tratamiento) y un control positivo (tratado con un bactericida comercial).

Figura 12. Inoculación del fruto

Figura 13. Incorporación de humedad

RESULTADOS

Aislamiento e identificación de Xanthomonas arboricola pruni

La bacteria fitopatógena fue aislada exitosamente a partir de frutos de chabacano (*Prunus armeniaca*), presentando una morfología colonial amarilla con aspecto mucoso, rasgo característico del género *Xanthomonas*. La tinción de Gram reveló la presencia de bacilos gramnegativos, compatibles con la morfología descrita para esta especie.

Para confirmar la patogenicidad del aislamiento, se llevó a cabo la reinoculación en frutos sanos, lo que dio lugar a la aparición de síntomas característicos de la enfermedad, como lesiones necróticas y exudados gomosos, validando la identidad del patógeno y su relación causal con la enfermedad observada en campo.

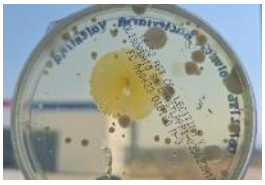


Figura 14. Formación de colonias amarillas

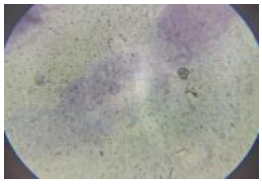
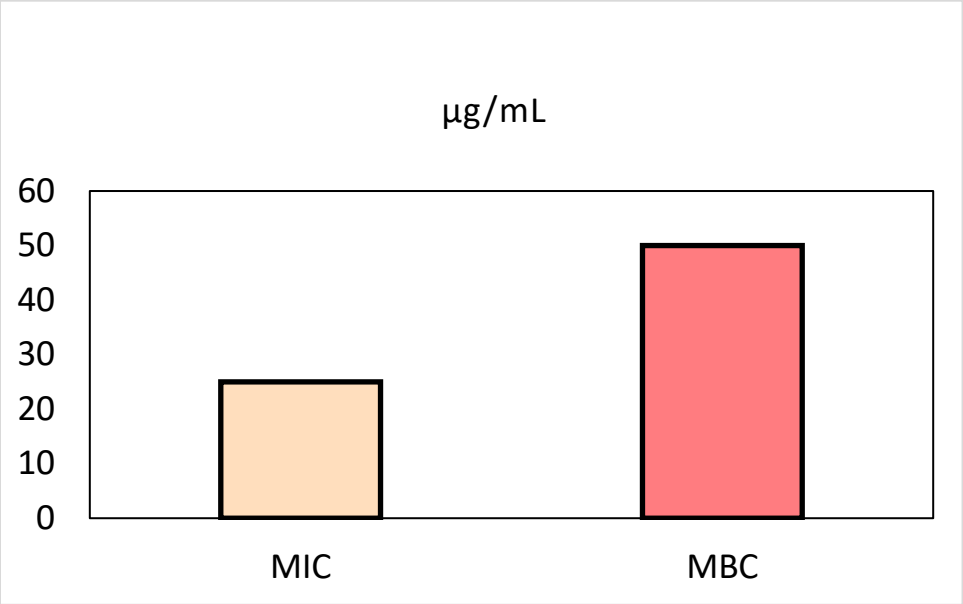


Figura 15. Bacilos y tinción gram

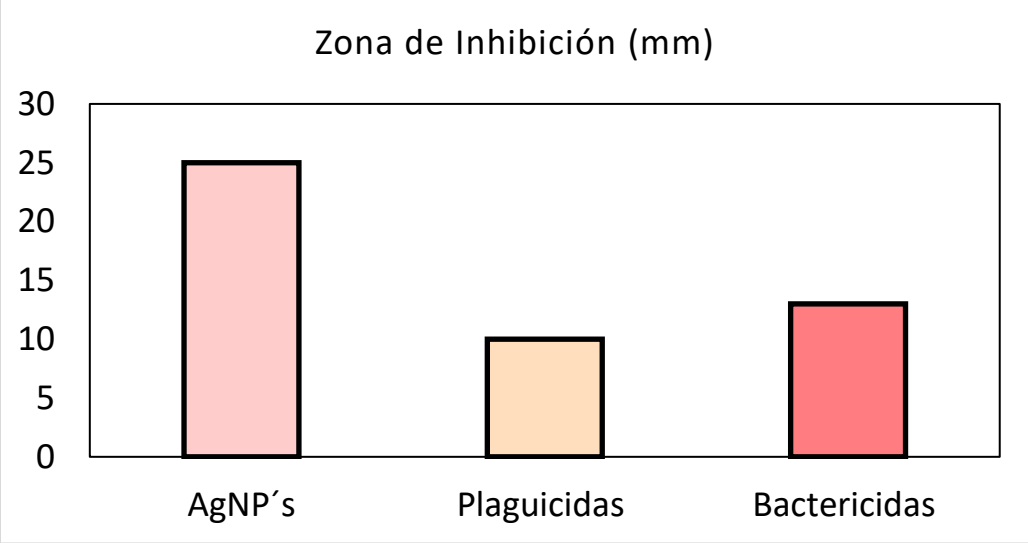
Evaluación antimicrobiana de las nanopartículas de plata (AgNPs)

Se evaluó la actividad antimicrobiana de las AgNPs sintetizadas con extracto de romero frente a *Xanthomonas arboricola pruni*. El ensayo de sensibilidad microbiana reveló que las zonas de inhibición provocadas por las AgNPs oscilaron entre 18 y 25 mm, superando significativamente a las zonas generadas por plaguicidas convencionales, que no excedieron los 15 mm.

En términos de concentración efectiva, se determinó una Concentración Mínima Inhibitoria (MIC) de 25 µg/mL, y una Concentración Bactericida Mínima (MBC) de 50 µg/mL. Estos valores confirman que las AgNPs poseen una notable capacidad antimicrobiana, capaz de inhibir y eliminar completamente a la bacteria patógena a bajas concentraciones.



Gráfica 1. MIC y MBC



Gráfica 2. Zonas de Inhibición

Impacto del tratamiento con AgNPs en frutos de chabacano

Para evaluar la eficacia de las AgNPs en condiciones más cercanas a las reales, se trataron frutos de chabacano infectados con *Xanthomonas arborícola pruni*. Los resultados fueron los siguientes:

- **Frutos sin tratamiento:** mostraron una progresión grave de la enfermedad, con lesiones extensas, ablandamiento del tejido y deterioro visible (Figura A).
- **Frutos tratados con AgNPs:** evidenciaron una recuperación óptima, con notable reducción de los síntomas y conservación de las características organolépticas del fruto (Figura B).

- **Frutos sanos tratados con AgNPs:** no presentaron efectos adversos sobre el crecimiento ni sobre el desarrollo del fruto (Figura C), lo que demuestra una baja fitotoxicidad de las nanopartículas en las concentraciones utilizadas.

Figura 16. Tratamiento de los frutos

CONCLUSIÓN

La presente investigación aporta evidencia significativa sobre el potencial de las nanopartículas de plata (AgNPs), sintetizadas mediante métodos verdes a partir de extractos vegetales, como una estrategia prometedora para el manejo de enfermedades bacterianas en cultivos agrícolas. En un contexto donde el uso excesivo de agroquímicos ha generado preocupación por sus efectos ambientales, sanitarios y económicos, el desarrollo de alternativas más sostenibles se vuelve cada vez más necesario. En este sentido, las AgNPs se posicionan como una herramienta innovadora que conjuga eficacia, sustentabilidad y accesibilidad.

Los resultados obtenidos reflejan que las AgNPs ejercen una acción antimicrobiana notable frente a bacterias fitopatógenas, inhibiendo su crecimiento de forma más eficiente que algunos plaguicidas convencionales. Esta actividad permite no solo controlar la progresión de la enfermedad en frutos infectados, sino también prevenir nuevos brotes sin generar daños en los tejidos vegetales tratados. A diferencia de muchos productos químicos, que pueden tener efectos fitotóxicos o dejar residuos, las AgNPs no mostraron impactos negativos en la apariencia ni en el desarrollo de los frutos sanos, lo cual representa una ventaja considerable en términos de seguridad alimentaria.

Uno de los aspectos más relevantes de esta propuesta es la forma en que se sintetizan las nanopartículas. Utilizar extractos naturales, como los derivados del romero, no solo permite reducir el uso de compuestos tóxicos en el proceso, sino que también aporta principios activos con propiedades antibacterianas propias, potenciando así el efecto de las AgNPs. Este enfoque biotecnológico representa una tendencia creciente en la ciencia aplicada a la agricultura: aprovechar los recursos que ofrece la naturaleza para desarrollar soluciones tecnológicamente avanzadas, pero al mismo tiempo respetuosas con el entorno.

Otro punto para destacar es la versatilidad del método y su potencial adaptabilidad a otros cultivos o fitopatógenos. Si bien este estudio se centró en una enfermedad específica que afecta el cultivo de chabacano, los resultados obtenidos sientan un precedente para extender la aplicación de estas nanopartículas a otros sistemas agrícolas. En este contexto, el chabacano sirve como modelo de estudio no solo por su valor económico y nutricional, sino también por su vulnerabilidad ante infecciones bacterianas que comprometen seriamente la calidad del fruto y el rendimiento del cultivo. Al lograr una recuperación visible y sin efectos secundarios tras el tratamiento con AgNPs, se refuerza la idea de que su uso podría generalizarse con las adaptaciones adecuadas.

La implementación de tecnologías basadas en nanobiotecnología verde puede formar parte de estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades, disminuyendo la dependencia de productos químicos sintéticos y reduciendo los impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana. Asimismo, estas herramientas pueden ser complementadas con otras prácticas agroecológicas, como la rotación de cultivos, el uso de biofertilizantes y el monitoreo biológico, para

construir sistemas productivos más equilibrados y adaptados a los desafíos actuales del cambio climático y la seguridad alimentaria.

Sin embargo, es importante señalar que aún existen pasos por recorrer para la implementación práctica y masiva de esta tecnología. Aunque los resultados en condiciones controladas han sido altamente positivos, será necesario validar su eficacia a nivel de campo, considerando factores como el clima, la interacción con el suelo y otros organismos del agroecosistema. Además, deberán evaluarse aspectos relacionados con la dosificación adecuada, la estabilidad de las nanopartículas, los métodos de aplicación más eficientes, y el posible desarrollo de resistencia bacteriana ante su uso prolongado.

BIBLIOGRÁFIA

1. Ahmad, T., Wani, I. A., Manzoor, N., Ahmed, J., & Asiri, A. M. (2013). Biosynthesis, structural characterization and antimicrobial activity of gold and silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 107, 227–234. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.02.019
2. Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. *Journal of Advanced Research*, 7(1), 17–28. https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007
3. Das, B., Dash, S. K., Mandal, D., Ghosh, T., Chattopadhyay, S., Tripathy, S., & Das, S. (2013). Green synthesized silver nanoparticles destroy multidrug resistant bacteria via reactive oxygen species mediated membrane damage. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(6), 862–876. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.01.013
4. Durán, N., Durán, M., de Jesus, M. B., Seabra, A. B., Fávaro, W. J., & Nakazato, G. (2016). Silver nanoparticles: A new view on mechanistic aspects on antimicrobial activity. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 12(3), 789–799. https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.11.016
5. Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10), 2638–2650. https://doi.org/10.1039/C1GC15386B
6. Rai, M., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P., & Gade, A. K. (2012). Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 112(5), 841–852. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x
7. Salas-Orozco, M., Dublán-García, O., Ibarra-Reynoso, L. D. R., & Angoa-Pérez, M. (2021). Silver nanoparticles synthesized with plant extracts in the control of phytopathogens: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1–14. https://doi.org/10.1155/2021/5551149
8. Srikar, S. K., Giri, D. D., Pal, D. B., Mishra, P. K., & Upadhyay, S. N. (2016). Green synthesis of silver nanoparticles: A review. *Green and Sustainable Chemistry*, 6(1), 34–56. https://doi.org/10.4236/gsc.2016.61004

EFECTO DEL RESVERATROL SOBRE LOS FIBROBLASTOS DE PIEL DE HÁMSTER SIRIO DORADO NEONATO Y ADULTO

América MichelleGarcía Rosales[1], José Roberto Vazquez Avendaño[2], AlfredoTrejo Córdova[2], Demetrio AlonsoAmbriz García[2], Navarro Maldonado María del Carmen[2].

[1]Licenciatura en Biología Experimental. [2]Departamento de Biología de la Reproducción. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco Núm. 186. Col. Leyes de Reforma 1ª Sección, Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09310. Ciudad de México, México.
carmennavarro2006@yahoo.com.mx

RESUMEN

El resveratrol es un antioxidante y regulador de la expresión génica, presente en uvas, vino y frutos rojos, utilizado en la industria farmacéutica, cosmética, en cultivos celulares y en procesos reproductivos. En este último caso, se utiliza para mejorar la maduración *in vitro* de ovocitos, la conservación espermática y el desarrollo *in vitro* de embriones en mamíferos, al favorecer la supervivencia celular. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del resveratrol sobre las colonias de fibroblastos de piel de hámster sirio dorado (*Mesocricetus auratus*) neonato y adulto, durante 6 pasajes celulares. Se utilizaron biopsias de piel de oreja de un neonato (1 día de edad) y del dorso en una hembra adulta (6 meses de edad). Los tejidos se lavaron y desinfectaron, y se sembraron como explantes en cajas Petri con DMEM-F12 suplementado con antibióticos y suero de ternera recién nacida (NCS), dividiéndolas en dos grupos: Experimental neonato (GEN) y adulta (GEA), que se trataron con 0.5 µM de resveratrol. Control neonato (GCN) y adulta (GCA), sin resveratrol. Se incubaron a 38°C y 5% de CO_2 en humedad relativa alta hasta alcanzar >90% de confluencia. Posteriormente, la mitad de la población celular se despegó de la caja de cultivo con tripsina y se resembró, repitiendo la resiembra hasta obtener 6 pasajes celulares. De cada pasaje se evaluó la concentración celular en cámara de Neubauer, observando que, en neonato, el resveratrol afectó la concentración celular en los pasajes 2 a 6, con respecto al control (de 131,000 a 192,000 células en GEN vs. 164,000 a 294,000 células en GCN, p=0.163), denotando un probable efecto deletéreo del resveratrol. En tanto que, en adulta, el resveratrol aumentó la concentración celular (de 80,000 a 284,000 en GEA vs. 66,000 a 174,000 en GCA, p=0.043), lo que representó un aumento de 164% y 255%, respectivamente. En el presente trabajo, el resveratrol favoreció la sobrevivencia y proliferación de los fibroblastos en animal adulto, probablemente debido a las rutas metabólicas diferenciales según la edad.

Agradecemos a Rectoría General de la UAM y al CONAHCyT (hoy SECIHTI), por los fondos otorgados para el desarrollo del proyecto de base tecnológica en proceso de maduración, y del proyecto de ciencia básica y de frontera C-459/2024, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

Para la clonación de embriones de mamíferos es necesario la utilización de dos células: el carioplasto o célula somática y el citoplasto o célula ovocitaria anucleada. El resultado de la técnica es más favorable a partir de células somáticas embrionarias o aquellas procedentes de animales jóvenes, sin embargo es más frecuente la consideración de querer clonar embriones a partir de individuos adultos toda vez que éstos han mostrado un potencial productivo reproductivo, o alguna característica hallada como deseable a través de su vida, en caso de animales productivos de granja o silvestres o incluso solo por un alto valor afectivo o sentimental, en el caso de animales mascota.
Por otro lado, el resveratrol ha sido utilizado en diversos cultivos celulares por su efecto potencial antioxidante así como regulador génico. Potenciando en diversos cultivos celulares la prolificidad celular y la colonización completa de una caja o frasco de cultivo, condición conocida como estado de confluencia. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del resveratrol sobre las colonias de fibroblastos de piel de hámster sirio dorado (*Mesocricetus auratus*) neonato y adulto, durante 6 pasajes celulares, que son los requeridos para el proceso de desdiferenciación celular y

reprogramación nuclear requisitos para que dichos fibroblastos actúen como células totipotenciales y una vez fusionados con un ovocito enucleado puedan construir un embrión íntegro y en su caso un feto y posteriormente un recién nacido completo y saludable.

TEORÍA

El resveratrol es un compuesto polifenólico natural que se encuentra en diversas plantas, especialmente en la piel de las uvas rojas, moras y cacahuates. Ha sido ampliamente estudiado en los laboratorios de biología de la reproducción y en cultivos celulares debido a sus múltiples beneficios biológicos, incluyendo propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, y su capacidad para modular diversas vías de señalización celular (Lee y Park, 2023). En el contexto de reproducción asistida, el resveratrol ha mostrado un papel significativo en mejorar la calidad de los gametos y en la protección de las células reproductivas frente al estrés oxidativo, un factor clave en la disfunción reproductiva (Luo y Liu, 2023).

En biología reproductiva, el resveratrol se ha investigado principalmente por sus propiedades protectoras contra el daño oxidativo. El estrés oxidativo es una de las principales causas de la disminución de la calidad de los ovocitos y los espermatozoides, contribuyendo a la infertilidad. Se ha demostrado que el resveratrol, como antioxidante, reduce el daño a las células reproductivas al neutralizar los radicales libres y mejorar la actividad de las enzimas antioxidantes endógenas (Chen y Li, 2023).

El uso del resveratrol en cultivos celulares se ha expandido debido a su capacidad para modular la proliferación celular (Chai y Zaho, 2023). El resveratrol puede inducir efectos tanto pro-proliferativos como antiproliferativos dependiendo de la concentración y el tipo de célula. En concentraciones bajas, ha mostrado estimular la proliferación de células madre mesenquimales y la regeneración tisular, lo que resulta útil en el ámbito de la terapia regenerativa. En contraste, a concentraciones más altas, el resveratrol puede inhibir la proliferación de células cancerosas al inducir la apoptosis y bloquear el ciclo celular en fases clave (Martínez *et al*., 2002).

Además de su capacidad para influir en la proliferación celular, el resveratrol ha mostrado varios otros efectos beneficiosos en los cultivos celulares (Jang *et al*., 2022). Sus propiedades antiinflamatorias han sido útiles en estudios donde se investigan patologías crónicas, como en modelos de enfermedades neurodegenerativas y cardiovasculares. El resveratrol también puede mejorar la viabilidad celular bajo condiciones de estrés, como la hipoxia o la exposición a toxinas, gracias a su capacidad para activar vías de señalización que favorecen la supervivencia celular, como las vías de la Sirtuína-1 (SIRT1) y la proteína quinasa activada por AMP (AMPK). Su versatilidad lo convierte en una herramienta valiosa tanto en la investigación básica como en aplicaciones terapéuticas potenciales (Li y Sun, 2023).

La deriva de células de piel se ha utilizado para el estudio de la histología o fisiología celular, para la obtención de células madre en la terapia celular y para la obtención de carioplastos en la clonación de embriones por transferencia nuclear de células somáticas (TNCS) en mamíferos (Lee y Park, 2023). El cultivo celular implica la creación de un entorno simulado que reproduce las condiciones fisiológicas necesarias para la supervivencia y proliferación de las células. Los componentes esenciales de este entorno incluyen un medio de cultivo adecuado, condiciones ambientales controladas (temperatura, pH, concentración de gases), y la provisión de factores de crecimiento y nutrientes (Chai y Zaho, 2023).

La deriva y cultivo de fibroblastos de piel es una técnica ampliamente utilizada en biología, en un entorno controlado in vitro. Los fibroblastos son las principales células del tejido conectivo y desempeñan un papel crucial en la síntesis de la matriz extracelular y en la cicatrización de las heridas. El cultivo de fibroblastos de piel implica la obtención de muestras de tejido, la disgregación de las células y su mantenimiento en condiciones óptimas de crecimiento (Martínez *et al*., 2002).

PARTE EXPERIMENTAL

Recolección y preparación de la muestra de piel.
Se utilizaron 2 ejemplares de hámster sirio dorado, Un neonato de 1 día de edad y 1 g de peso corporal, y una hembra adulta (6 meses de edad y un peso de 157 g) alimentada durante 20 días con cáscara de frutas y agua *ad libitum*, mantenida en fotoperiodo de 14h luz/10h oscuridad, con cama sanitaria limpia. De cada ejemplar se tomó una biopsia de piel de 0.5mm^2 (en el neonato de la oreja y en la adulta del dorso). Para ello, se realizó asepsia zonal de la piel con alcohol y se obtuvo la muestra con tijeras bajo condiciones estériles.

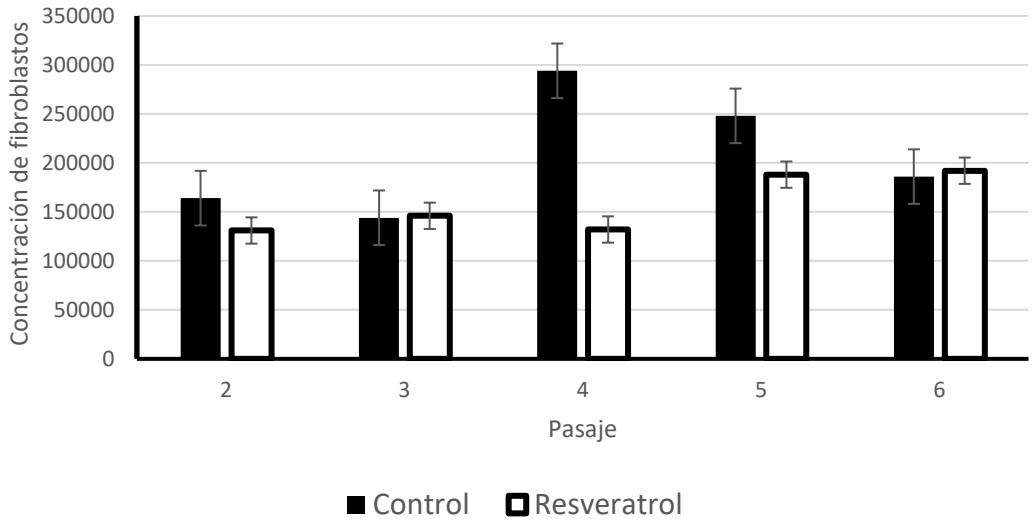
Las muestras de piel se manejaron por separado, efectuando 4 lavados. El primero, en 1mL de alcohol al 70% durante 5 segundos, posteriormente 3 lavados en 1mL de DPBS para eliminar restos de sangre y contaminantes. Posteriormente, los tejidos se fragmentaron manualmente con bisturí sembrándolos como explantes de 2 mm en cajas Petri de 2.5 cm de diámetro (4 cajas en total). Se les adicionaron 3mL de medio DMEM-F12 (In Vitro S.A., CDMX, México) suplementado con suero fetal de ternera y antibiótico-antimicótico. Los grupos experimentales de cada ejemplar (Rn = neonato y Ra = adulto) se trataron con resveratrol a 0.5µM durante la deriva. Los grupos control (Cn y Ca) no se trataron con resveratrol. Los explantes se cultivaron a 38°C y 5% de CO_2 en humedad relativa alta, hasta observar deriva de fibroblastos y que se lograra la confluencia.

Se cambió el medio de cultivo cada 3 o 4 días para evitar contaminación y se evaluó la proliferación celular en todos los grupos (Rn, Ra, Cn, Ca) hasta que alcanzaran una confluencia mayor o igual al 90%. Posteriormente, los fibroblastos se despegaron de la base de las cajas. La población celular se resembró en nuevas cajas de cultivo, dividiéndola para formar nuevos grupos experimentales (Rn, Ra) y controles (Cn, Ca) de cada pasaje hasta completar 6 pasajes.

Las colonias celulares de cada pasaje se contaron en cámara de Neubauer. Los resultados fueron analizados con una prueba t-Student con significancia de $p<0.05$.

RESULTADOS

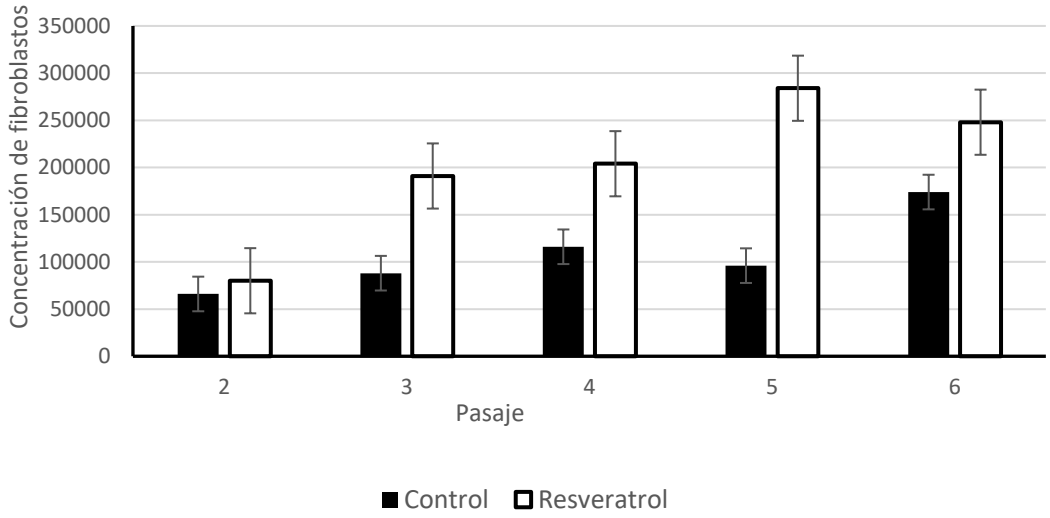
Fig. 1. Efecto del resveratrol en la proliferación de fibroblastos de piel de hámster neonato, durante 6 pasajes (n=3).



En la figura 1 se observa que al adicionar resveratrol, la concentración de fibroblastos de piel de hámster neonato fue similar a la del grupo control en los pasajes 2, 3 y 6, mientras que se redujo en los pasajes 4 y 5.

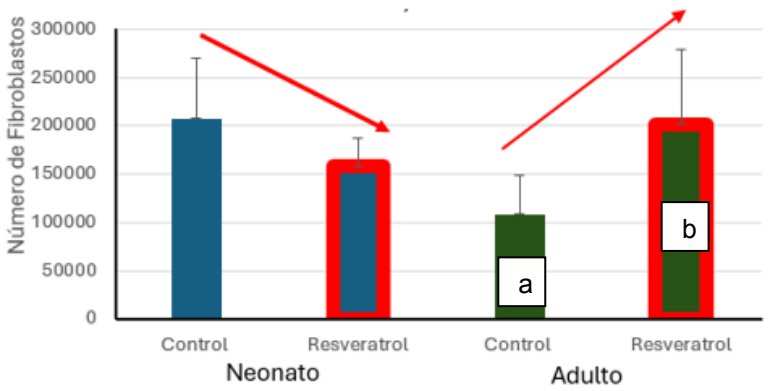
En la figura 2 se observa un aumento en la concentración de los fibroblastos de piel de hámster adulta, a partir del pasaje 3 y hasta el pasaje 5, en el que el resveratrol aumentó la concentración en casi un 300% (desde una concentración celular de 96 x 10^3 hasta una de 284 x 10^3).

Fig. 2. Efecto del resveratrol en la proliferación de fibroblastos de piel de hámster adulta, durante 6 pasajes (n=3).



En la figura 3 se compara el promedio de la concentración celular de todos los pasajes, por tratamiento y origen de los fibroblastos observándose que, en neonato, el resveratrol disminuyó la concentración de fibroblastos (aunque no llegó a la significancia P=0.16), en tanto que, en adulta, incrementó significativamente su concentración (P= 0.04).

Figura 3 Concentración de fibroblastos



DISCUSIÓN

Los resultados muestran que, bajo las condiciones estudiadas, para los fibroblastos de hámster neonato la adición de resveratrol no resultó favorable, particularmente en el pasaje 4, donde disminuyó a más de la mitad la concentración de fibroblastos (de 294 x 10^3 a 132 x 10^3), en tanto que en el pasaje 5, la disminución fue de casi del 25%.

El modelo neonato se caracteriza por presentar una concentración celular más elevada y una capacidad proliferativa más eficiente en comparación con las células derivadas de hembras adultas. Estas diferencias reflejan los contrastes fundamentales en los procesos biológicos y metabólicos entre las etapas tempranas y avanzadas del desarrollo, subrayando la influencia de la edad (Figura 4) y el estado fisiológico en la dinámica celular (Sánchez *et al*., 2020).

En este contexto, el resveratrol, un compuesto con propiedades antioxidantes y moduladoras del metabolismo celular, ejerce un efecto diferenciado en la deriva y el pasaje celular dependiendo de la condición específica de los fibroblastos. Este polifenol muestra una tendencia a favorecer de manera más significativa la proliferación de fibroblastos cuando provienen de ejemplares adultos, lo que sugiere una interacción específica entre las características del microambiente celular y la acción del compuesto (Guerrero, 2014). Este comportamiento diferencial puede atribuirse a varios factores, incluyendo variaciones en la expresión de receptores de membrana, la capacidad de respuesta a señales extracelulares y las diferencias intrínsecas en los mecanismos de reparación y renovación celular. Además, es posible que el resveratrol actúe como un modulador selectivo que optimiza el equilibrio entre proliferación y diferenciación en las células de hembras adultas, contrarrestando parcialmente las limitaciones funcionales asociadas con la maduración y el envejecimiento celular (Pervaiz, 2003). En células adultas en condiciones normales el resveratrol, a bajas concentraciones, estimula el RTK (Receptor tirosina quinasa) y, con ello, las rutas de proliferación celular P13k/Akt (Phosphoinositide 3-Kinase / Protein Kinase B) y MAPK/ERK (Mitogen- Activated Protein Kinase/ Extracellular Signal – Regulated Kinase) (Kumar y Singh, 2023).

En células MCF-7 (cáncer de mama), se ha visto que el resveratrol inhibe la proliferación celular al bloquear la fase S del ciclo celular evitando la duplicación del ADN. Ello, debido a que disminuye la señalización de PI3K/Akt (Phosphoinositide 3-Kinase / Protein Kinase B) (Vera, 2012) y reduce la activación de mTORC1 (Mechanistic Target of Rapamycin Complex 1)), con lo que se activa el AMPK (Activated Protein Kinase) y el complejo TSC1/TSC2 (Tuberous Sclerosis Complex) o genes suprosores tumorales, reduciendo la proliferación celular (Kim y Choi. 2023). Estos mismos efectos han sido observados en una línea celular de cáncer de próstata (Baur y Sinclair, 2006).

Por otro lado, el resveratrol neutraliza las especies reactivas de oxígeno (ERO).
La utilización del resveratrol en células somáticas adultas resulta importante para los propósitos de esta investigación, ya que permitirá obtener cultivos de fibroblastos adultos de buena calidad, con fines de clonación de embriones de animales productivos y de fauna silvestre, debido a que son obtenidos a partir de individuos adultos.

Fig 4. Hámster neonato y adulto.

CONCLUSIÓN

Los hallazgos resaltan la importancia de considerar la edad del animal donador de las células somáticas, al estudiar la influencia de agentes bioactivos como el resveratrol, dado que hay un efecto sinérgico en la proliferación celular cuando los fibroblastos proceden de un animal adulto y en cambio la inhibe si proceden de un animal neonato.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Bru Martínez y M.A.Pedreño García, (2002). Procedimiento para la producción de resveratrol en cultivos celulares. Patente. Universidad de Murcia. España.
2. C. Liwei y Zhao Pengfei. (2023). Resveratrol in Combating Proliferative Disorders. Journal of Molecular Biology, 435(14): 167892.
3. C. Rong y L. Jing. (2023). Resveratrol in Anti-Inflammation and Antiproliferation. Nature Reviews Cancer, 23(5): 278-292.
4. J.A. Guerrero Castillo (2014). Efecto del resveratrol sobre la proliferación celular y estrés oxidativo en células de cáncer de mama. Trabajo de fin de grado, Universitat de les Illes Balears. España.
5. J. Jang Yeon, I. Eun, D. Kim Nam. (2022). Mechanism of Resveratrol-Induced Programmed Cell Death and New Drug Discovery against Cancer: A Review. International Journal of Molecular Sciences, 23(22): 13689
6. K. Soo y C. Hyun. (2023). Anti-Angiogenic Effects of Resveratrol on Tumor Microenvironment. Angiogenesis, 26(1): 45-58.
7. K. Anil y S. Priya. (2023). Resveratrol and its Analogues as Anticancer Agents. Pharmacological Reviews, 75(2): 325-349.
8. L. Jihoon y P. Hyejin. (2023). Resveratrol as an Epigenetic Modulator in Cancer Cells. Epigenetics, 18(3): 211-225.
9. L. Min y S. Zhen. (2023). Resveratrol in Regulating Tumor Microenvironment. Tumor Biology, 45(4): 123-135.
10. L. Yan y L. Jian. (2023). Resveratrol's Role in Cancer Immunotherapy. Journal of Cancer Immunology, 5(3): 150-162.
11. M.S. Sánchez-Reus, M. A. Gómez del Río, I. Iglesias y M. Elorza. (2020). El papel del resveratrol sobre el estrés oxidante inducido por la exposición a cobre en cultivos celulares. Nutrición Hospitalaria, 37(3): 568-574.
12. J.C. Vera Urbina. (2012). Producción de resveratrol mediante cultivos de células vegetales de vid (*Vitis vinifera L. cv. Gamay*): escalado y diseño de biorreactores. Tesis doctoral, Universidad de Alicante. España.
13. A. Baur Jason y A. Sinclair David. (2006). Therapeutic potential of resveratrol: the in vivo evidence. Nature Reviews Drug Discovery, 5(6): 493-506.
14. P. Shazib. (2003). Resveratrol: from grapevines to mammalian biology. The FASEB Journal, 17(14): 1975-1985.

ANÁLISIS DE PESTICIDAS EN POLEN DE TRES MUNICIPIOS DE GUANAJUATO

Luz Mireya Yañez González[1], Víctor Hugo Robledo-Zacarias[2], Elizabeth Quintana-Rodríguez [2], Paulina Rodríguez-García [2], Juan vazquez-Martinez[3], Miguel Yañez Boites[4], y Domancar Orona-Tamayo[2]*

[1]Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PICYT), [2]Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), SECIHTI, León, Guanajuato. [3]Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) Irapuato, Guanajuato, [4]Miel Yañez, León, Guanajuato.
dorona@ciatec.mx*

RESUMEN

La supervivencia de las abejas en el ecosistema se ha vuelto una prioridad a nivel global, debido al servicio de polinización que estas realizan[1]. Por ello, es crucial resolver la problemática a la que se enfrentan durante el proceso de forrajeo de las plantas de interés agronómico, especialmente debido a la creciente demanda de agroquímicos y pesticidas utilizados en los cultivos[2]. Por consiguiente, en los últimos años, en el estado de Guanajuato se ha reportado una disminución de la población de abejas. Para mitigar los riesgos a los que se enfrentan estos polinizadores, en el año 2019 se promulgo la ley para la protección de las abejas en el estado de Guanajuato[3]. Por lo tanto, es necesario estudiar la trazabilidad de los pesticidas e identificar si estos provienen de algún cultivo de interés agronómico. El objetivo de este trabajo fue analizar la presencia de los pesticidas en polen recolectado por abejas en las diferentes temporadas de floración del año 2024 en tres municipios del estado de Gto. Para esto, se seleccionaron apiarios aledaños a zonas agrícolas, y se colectaron muestras de polen. Adicionalmente, las muestras fueron separadas y clasificadas por color para identificar si este proviene de plantas silvestres o cultivables, utilizando una paleta Pantone U, y un espectrocolorímetro. Para la extracción de pesticidas del polen, se empleó un protocolo modificado de QuEChERS® y para la determinación se usó cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS). Se determino que algunos tipos de polen provienen de cultivos agrícolas como apio, ajo, jitomate y tomate. Además, polen proveniente de especies nativas como arrastradilla, girasol, frutilla y copalillo. Adicionalmente, el color predominante del polen fue el "sand yellow", asociado con ciertas especies vegetales dominantes de la región. Los principales pesticidas encontrados fueron el malathion y el chlorpyrifos, los cuales son considerados altamente peligrosos en México, además el malathion es el pesticida más abundante dentro de las muestras analizadas. Esta investigación tiene la finalidad de generar información y evidenciar cuáles son las zonas que representan una peligrosidad para las abejas y regular el uso de pesticidas en el estado de Guanajuato.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional ha generado una presión en la industria agroalimentaria para producir una mayor cantidad de alimentos, de manera más rápida y de alta calidad[4]. Esta demanda de productos agrícolas ha llevado al uso excesivo de agroquímicos, como los pesticidas para proteger los cultivos de fitopatógenos e insectos plaga que dañan los cultivos[5], así como han desencadenado efectos negativos tanto ambientales y ecológicos que amenazan la estabilidad de los ecosistemas agrícolas y la seguridad alimentaria mundial[5]. Por otro lado, los pesticidas en las plantas se adhieren al polen de las flores, y también al néctar floral, alimentos principales de las abejas, generándoles grandes afectaciones como la dificultad de encontrar alimento, cambios fisiológicos en el desarrollo larval, y también muerte inmediata [6]. Estos eventos repercuten en la población de abejas. Se conoce que las abejas melíferas (*A. melifera*) son los principales polinizadores de la mayoría de las plantas que producen alimentos para el ser humano, ya que estas se encargan de polinizar alrededor del 75% de los cultivos a nivel mundial, y cuyo servicio de polinización está valuado en más de 68 billones de dólares anuales solo en México[7], de ahí la importancia de supervivencia de este insecto. Una cita atribuida a Albert Einstein afirma que "si las abejas desaparecieran de la faz de la tierra, al hombre solo le quedarían cuatro años de vida[8]"

debido a que se desencadenaría una autentica crisis alimentaria generando un colapso mundial por los escases de alimento.
México se posiciona como el séptimo productor de miel a nivel global y décimo tercero en términos de exportación, generando un valor de más de US$67 millones para el año 2023 [9]. En el año de 2023, Guanajuato ocupo el décimo octavo lugar de miel con más de 700 ton[10,11]. Adicionalmente, el estado alberga a más de 36 mil colmenas distribuidas en 34 municipios y se contabilizan más de 1,400 apiarios y más de 500 apicultores [12], representando el 2% de la población total de colmenas en el país. Esta producción estatal genera ingresos anuales de poco más de 2 millones de dólares (SIAP, 2023), los cuales incrementan cada año. Los municipios que concentran la mayor producción de miel son: León con el 20% y San Francisco del Rincón con el 9%[13]. Entre los cultivos dependientes de la polinización en Guanajuato se encuentran los espárragos, jitomate, lechuga, brócoli, fresa y cebolla [7]. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar la presencia de pesticidas en el polen recolectado por abejas en diferentes municipios del estado de Guanajuato en diferentes temporadas, así como identificar la especie floral de la que proviene.

PARTE EXPERIMENTAL

Zonas de muestreo

Se seleccionaron diferentes zonas de estudio como el municipio de Silao de la victoria (21°02'04.4"N 101°28'06.7"O), el cual se encuentra dentro de un área agrícola, pero muy aproximada a la carretera del eje metropolitano, conocida por el alto tránsito vehicular. Las temporadas en las que se tomaron las muestras fuero en el periodo de junio-agosto de 2024, estos meses en la región se caracterizan por su clima cálido y húmedo. También, se tomaron muestras de polen de apiarios del municipio de Romita (20°52'24.8"N 101°39'30.6"O) en los meses de septiembre-noviembre de 2024, cuyo clima en esta temporada es muy seco. Finalmente, muestras de polen fueron recolectadas del municipio de San Francisco del Rincón (20°53'13.4"N 101°48'08.0"O) que se encuentra ubicado en un área agrícola, con un clima seco en los meses de enero-abril de 2025. Las coordenadas de los sitios de muestreo fueron georreferenciadas con un equipo de posicionamiento global (Garmin Etrex 32X, USA).

Recolección de polen

Para la recolección del polen de los apiarios, se utilizó una trampa de polen, la cual permite solamente la entrada de la abeja, la cual ayuda a retirar el polen transportado por la abeja. Posteriormente, se tomó el polen recolectado en un frasco y se transportó con hielo seco para ser almacenado a -20°C.

Separación y clasificación del polen por colores

El polen se separó manualmente en base a su color. Posteriormente, se procedió a identificar el color con la paleta Pantone U (MATCHING SYSTEM, 2019) la cual es un instrumento subjetivo de medición que proporciona un lenguaje universal del color. Adicionalmente, se realizó una medición cuantitativa del color mediante un espectrocolorímetro de esfera (Datacolor Tools Plus), para ello, el polen fue pulverizando y se colocaron 0.3 g sobre un portaobjetos. Con el cual se realizaron obtuvieron las coordenadas en las que se encuentra el color del polen en el espacio de color CIELab (Comisión Internacional de la Iluminación), representando los ejes cromáticos:

L: Significa claridad, y mide si la muestra es clara u oscura.
a: Representa el eje verde/rojo.
b: Representa el eje azul/amarillo.

Una vez identificado cada color, el polen fue colocado nuevamente en refrigeración a -20°C para los análisis subsecuentes. Posteriormente, se realizó una búsqueda para determinar la especie botánica basado en los colores del polen y flores, utilizando el documento técnico base del Inventario de Especies Vegetales Nativas del Estado de Guanajuato (SMAOT 2020), así como los cultivos

cercanos a la zona de colecta, y a través de recorridos, información proporcionada por los apicultores y datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2023),se determinaron los géneros de plantas de donde proviene el polen.

Extracción de pesticidas

Para la extracción de los pesticidas presentes en el polen, se utilizó el kit QuEChERS (rápido, fácil, barato, efectivo, resistente y seguro, por sus siglas en inglés). Se tomo 1 g de polen de cada zona seleccionada, el cual fue pulverizado y transferido a un tubo de 50 ml. Posteriormente, se adiciono 1 ml de acetonitrilo, y la mezcla se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 min. Se tomó una alícuota de 0.5 ml de la parte superior y se transfirió a otro tubo, al que se le adicionaron 75 mg de $MgSO_4$, el cual induce la separación de fases entre el contenido de agua en la muestra y la capa de acetonitrilo y elimina el agua restante. Se adicionaron 12.5 mg de PSA (Amina Secundaria Primaria), que se utilizó para extraer los componentes polares y ácidos grasos libres de la muestra. Finalmente, se adicionaron 1.25 mg de negro de carbono gratificado (GCB), el cual se encargó de eliminar los pigmentos de la muestra. La mezcla se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 min, y el sobrenadante fue colectado y sometido a un análisis cromatográfico.

Identificación y cuantificación de los pesticidas

Para la identificación y cuantificación de los pesticidas presentes en el polen, se utilizó el sistema de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS) (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA) equipado con una fuente de ionización de electrospray (ESI). Se inyectaron 500 µl de los estándares que contienen diferentes mezclas de pesticidas (Accustandard, CP-MI-01, CP-MI-02 y CP-MI-03-R1) a una concentración de 500 ng/mL. La separación cromatográfica se logró mediante una columna, Kinetex $EVOC_{18}$ (2.1 mm x 50 mm, 1,7 micras). El programa de corrida cromatográfica opero de modo positivo y negativo. Posteriormente, se realizó la curva de calibración de 1 a 350 ng/ml, operando el instrumento en modo de ionización positiva durante 15 min. Se utilizó al 40% la fase móvil A de buffer de acetato y ácido fórmico al 0.1% y al 60% la fase B, metanol y alcohol isopropílico más acido fórmico al 0.1%.

Análisis estadístico

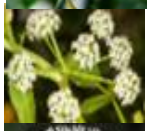
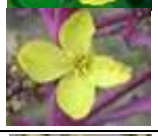
Los experimentos se realizaron con tres repeticiones individuales los resultados se expresaron con desviación estándar, utilizando análisis de la varianza (ANOVA) y pruebas Poshoc (Tukey-Test). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales 17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL).

RESULTADOS

Color del polen

El análisis del color del polen recolectado en las zonas muestreadas, reveló principalmente que el polen es principalmente de color amarillo (110 U). Esta tonalidad fue la más representativa entre las muestras analizadas, lo que sugiere una alta predominancia de plantas que producen flores amarillas en los alrededores de los apiarios. Los tonos amarillos observados están estrechamente relacionados con especies agronómica presentes en las regiones de muestreo. Específicamente, se identificó la presencia de polen derivado de flores de plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*), melón (*Cucumis melo* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.). Durante el año del estudio, dichas especies presentaron una extensión cultivada significativa en la región, con superficies estimadas de 85 hectáreas para jitomate en el municipio de Silao de la victoria, 42 hectáreas para melón en Romita y 280 hectáreas para cebolla en San Francisco del Rincón (SIAP, 2023) (Tabla 1).

Tabla 1. Planta fuente y color del polen.

	Flor	Nombre	Pantone	CIELab	Polen
Silao		**Tomate** (*Physalis philadelphica*)	124 U	L: 65.44, a: 7.79 y b: 46.9	Sand yellow
		Jitomate (*Solanum lycopersicum*)			
		**Apio** *(Apium graveolens)*	110 U	L: 62.44, a: 12.2 y b: 61.54	Yellow
		Ajo *(Allium sativum)*			
Romita		**Melon** *(Cucumis melo)*	110 U	L: 53.94, a: 18.1, b: 71.46	Yellow
		**Repollo** *(Brassica oleracea)*			
San Francisco		**Cebolla** *(Allium cepa L.)*	103 U	L: 55.91, a: 8.87 b: 47.53	India yellow
		Alfalfa *(Medicago sativa; L.)*			

Tipos de pesticidas encontrados en el polen

El análisis de plaguicidas residuales en polen, reveló que existen tres tipos de compuestos que son insecticidas, fungicidas y acaricidas (Figuras 1, 2 y 3. Tabla 1). Por ejemplo, el insecticida Malatión fue el compuesto detectado en mayor concentración en las tres áreas de estudio como Silao, Romita y San Francisco con valores de 90.43, 41.92 y 63.61 µg/kg, respectivamente. Estas concentraciones presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las localidades (p = 0.05), como se ilustra en la Figura 1, indicando una variabilidad en la intensidad de aplicación o persistencia ambiental de este compuesto para cada zona. En contraste, el resto de los insecticidas analizados no mostraron patrón de concentración uniforme entre las zonas evaluadas, evidenciando que su presencia varía considerablemente en función de la zona estudiada. Específicamente, los insecticidas carbofurán, clorpirifos y spirotetramat no presentaron diferencias significativas entre estos compuestos en cuanto a sus concentraciones detectadas en las tres regiones estudiadas (p = 0.05).

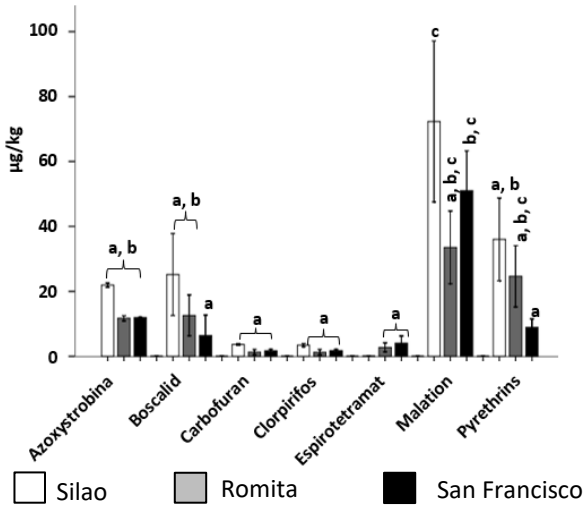


Figura 1 Cuantificación de insecticidas presentes en el polen de abeja. Las barras representan el ± error estándar y las letras diferencias significativas (P < 0.05 de acuerdo con el test ANOVA, Tukey-test; n= 3).

Respecto a los fungicidas, se encontraron tres tipos, por ejemplo, Fludioxonil se encontró en mayor proporción en Silao. El Imidacloprid, fue encontrado en Romita y la zona de San Francisco y el Myclobutanil fue encontrado en las tres zonas estudiadas, Esto indica que los usos de estos fungicidas en la región de Guanajuato (Figura 2).

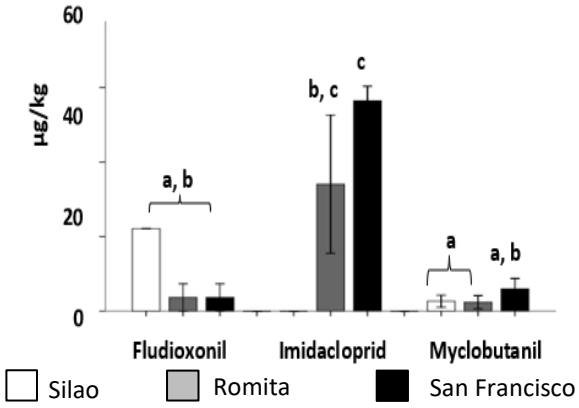


Figura 2. Cuantificación de los funguicidas presentes en el polen de abeja. Las barras representan el ± error estándar y las letras diferencias significativas (P < 0.05 de acuerdo con el test ANOVA, Tukey-test; n= 3).

En el caso de los acaricidas (Figura 3), los datos mostraron ausencia de diferencias significativas entre las 3 zonas. Sin embargo, se encontraron dos tipos como Bifenazato y Pyridaben. El primero solo fue encontrado. En la zona de Romita, el segundo fue encontrado solamente en las zonas de Silao y Romita.

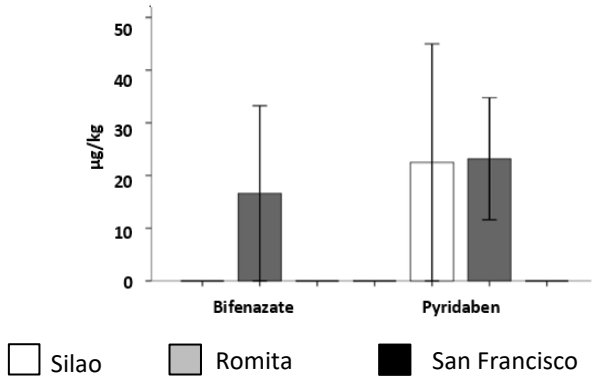


Figura 3. Cuantificación de los pesticidas presentes en el polen de abeja.
A) Insecticidas, B) Funguicidas y C) Acaricidas. Las barras representan el ± error estándar (P < 0.05 de acuerdo con el test ANOVA, Tukey y Post hoc n= 3).

La Tabla 1, resume todos los tipos de pesticidas encontrados en cada zona muestreada. Por ejemplo, se encontraron 18 insecticidas, 9 fungicidas y 2 acaricidas, los cuales constituyen una evidencia contundente del uso impacto ambiental asociado al uso intensivo y, en muchos casos, desregulaciones de plaguicidas en la industria agroalimentaria. La presencia ubicua de varios compuestos, y en particular las concentraciones elevadas de malatión refuerzan la urgencia de implementar políticas más estrictas de regulación, de pesticidas, con el objetivo de mitigar los efectos ecológicos y toxicológicos sobre los ecosistemas apícolas y sus servicios asociados, como la polinización. Por ejemplo, estudios en polen y miel identificaron 67 compuestos químicos como insecticidas, fungicidas y acaricidas[14], y las concentraciones de estos pesticidas fluctúan según la zona y el clima de la zona de recolección, datos similares a los nuestros. Por otro lado.

Afectaciones de los pesticidas en las abejas

El uso generalizado de pesticidas en la agricultura moderna ha generado una creciente preocupación por sus efectos adversos en organismos no objetivo, especialmente en las abejas melíferas (*Apis mellifera*), que desempeñan un papel crucial en la polinización de cultivos y en el equilibrio de los ecosistemas. Diversas investigaciones han evidenciado que la exposición a compuestos químicos como insecticidas, acaricidas y fungicidas puede interferir con funciones fisiológicas, neurológicas e inmunológicas de estos polinizadores. Específicamente, algunos pesticidas utilizados en el estado de Guanajuato tienen efectos negativos en las abejas. Por ejemplo, algunas de las afectaciones a las abejas causadas por el clorpirifos es que induce estrés oxidativo en las células nerviosas de las abejas[6]. Por otro lado, la permetrina está relacionada con la pérdida de movimiento y coordinación de las abejas, ocasionando parálisis y convulsiones[6,15]. Estos afectan los procesos de aprendizaje fundamentales para la orientación y reconocimiento del entorno, ya que los pesticidas alcanzan las principales vías neuronales de las abejas e interrumpen procesos de aprendizaje, memoria, navegación y ciertas funciones cognitivas[16]. La imidacloprida, es asociado con el síndrome de colapso de las colonias de abejas (CCD, por sus siglas en inglés). Este insecticida afecta el aprendizaje, la memoria, el control motor y la sensibilidad sensorial de las abejas, incluso en concentraciones muy bajas[17]. Por otro lado, la flonicamida genera el déficit de respuesta inmune a hongos como el *Nosema ceranae*, el cual provoca daños a su fisiología provocando abejas con menor tamaño (Tabla 2).

Tabla 2. Pesticidas presentes en el polen.

Compuestos	Concentración encontrada (µg/kg)			Dosis letal50 (µg/abeja)	Daños que genera a las abejas	Pesticidas más usados en Gto.
	Silao	Romita	San Francisco			
Insecticidas						
Aldicarb	333.11±20.04	1279.09±98.45	0.00±0.00	12.7	Daños al intestino	
Azoxystrobin	27.41±0.09	14.66±0.23	14.90±0.03	1.679	Cambios metabólicos	
Bifenthrin	0.00±2.43	22.98±2.50	0.00±	16610	Modifican el comportamiento	
Boscalid	31.51±1.72	17.48±1.93	24.31±1.11	0.76	Menor sentido olfativo	
Carbaryl	0.78±0.08	0	0	0.2411	Reducción del área de forrajeo	
Carbofuran	4.54±0.04	1.60±0.23	2.07±0.14	0.0812	Déficit de respuesta inmune	x
Chlorpyrifos	4.28±0.07	1.58±0.23	2.15±0.12	0.00513	Menor sentido a la sacarosa	
Clofentezine	31.43±3.42	0	13.05±2.84	0.02	N.E.	
Cyfluthrin	0	9.31±2.03	9.32±2.03	68.514	Inhibición de enzimas	x
Diazinon	0	0	18.94±4.12	0.1215	Menor sistema nervioso	x
Dimethoate	0	2.49±0.54	0	N.E.	Disminución de la población	
Spirotetramat	48.652.65	24.32±2.65	24.38±2.65	N.E.	N.E.	
Ethoprop	0	23.96±5.22	63.61±0.77	60	Altera el sistema nervioso	
Flonicamid	0	0	4.85±0.53	N.E.	Reducción de comunicación	x
Malathion	90.43±3.37	41.92±3.04	63.80±3.32	N.E.	Perdida de la capacidad de volar	
MGK-264	72.52±0.01	0	12.12±2.6	N.E.	Generan parálisis corporal	
Permethrin	44307.02±4822.86	0	0		Provoca desorientación	
Pyrethrins	45.031.73	30.80±2.57	11.19±0.69	N.E.	Muerte inmediata	
Fungicidas						
Fludioxonil	22.09±0	3.65±0.80	3.65±0.80	N.E.	Infecciones con N. ceranaeen	
Imazalil	0	37.47±2.88	0	0.12	Afectan la memoria	x
Imidacloprid	0	34.054.04	56.450.85	N.E.	Menor tamaño	x
Kresoxim-methyl	0	0	14.62±3.18	N.E.	N.E.	
Metalaxyl	0	0	1.26±0.61	4.69	Mayor demanda energética	
Myclobutanil	29.48±3.21	46.340.14	46.32±0.07	222	Daños a su fisiología	
Paclobutrazol	38.79±2.11	0	0		N.E.	
Propiconazole (Tilt)	0	0.19±0.02	0.46±0.02	2.076	Alteran el desarrollo de la larva	
Tebuconazol	0	0	11.54±0.14	35.123	Altera el intestino	
Acaricida						
Pyridaben	0	46.99±3.62	0	N.E.	Afecta el sistema nervioso	
Bifenazato	22.49±2.45	23.18±2.52	0	7.524	Reducen la memoria	

N.E.: No Evaluado

CONCLUSIONES

El polen recolectado en el municipio de San Francisco presentó la mayor concentración de residuos de pesticidas. No obstante, los municipios de Silao y Romita también mostraron presencia de residuos de pesticidas previamente registrados en el estado de Guanajuato. Cabe destacar que varios de estos compuestos están clasificados como plaguicidas altamente peligrosos en México, tales como clorpirifos y malatión[18], lo que evidencia un preocupante nivel de contaminación ambiental asociado al uso intensivo de agroquímicos en la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. FAO. *Las abejas son los diligentes polinizadores de las frutas y cultivos*. https://www.fao.org/3/y5110s/y5110s03.htm.
2. Muerte masiva abejas deja pérdidas por 2.4 mdp. Portal del colegio de la frontera Sur. https://www.ecosur.mx/muerte-masiva-abejas-deja-perdidas-por-2-4-mdp/.
3. Sinhue, D. *et al.* Ley para la Protección a las Abejas y el Desarrollo Apícola para el Estado de Guanajuato.

4. Sosa Baldivia, A., Ruíz Ibarra, G., Sosa Baldivia, A. & Ruíz Ibarra, G. La disponibilidad de alimentos en México: un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050. *Papeles Poblac* 23(93), 207–230 (2017).
5. OMS. Residuos de plaguicidas en los alimentos. *Organización Mundial de la Salud* https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food (2022).
6. Arenas Suárez, N. E. & Martin Culma, N. Y. Daño colateral en abejas por la exposición a pesticidas de uso agrícola. *Entramado* Vol. 4(1), pp. 232–240 (2018).
7. Quintana Rodríguez, E., Rocha Vallejo, A. R., Esparza Claudio, J. de J., Hernández Cumplido, J. & Orona Tamayo, D. Efecto de la contaminación atmosférica en los polinizadores del corredor industrial Guanajuato. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología* Vol. 7, pp. 52–71 (2024).
8. Paul Rodgers. Einstein And The Bees. Should You Worry? https://www.forbes.com/sites/paulrodgers/2014/09/09/einstein-and-the-bees-should-you-worry/ (2014).
9. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Crecen producción y exportaciones de miel en México. *Gobierno de México* https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecen-produccion-y-exportaciones-de-miel-en-mexico-al-cierre-de-2021-agricultura-293944?idiom=es (2021).
10. Chan Chi, J. R., Caamal Cauich, I., Pat Fernández, V. G., Martínez Luis, D., & Pérez Fernández, A. Caracterización social y económica de la producción de miel de abeja en el norte del Estado de Campeche, México. *Textual: análisis del medio rural latinoamericano*, (72), 103-123. (2018).
11. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. *Gobierno de México* https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon (2023).
12. INEGI. Panorama agropecuario en Guanajuato. (2013).
13. José Sánchez. Día Mundial de las Abejas. *Sol de León* https://www.elsoldeleon.com.mx/local/dia-mundial-de-las-abejas-guanajuato-productor-numero-18-en-produccion-de-miel-10092935.html (2023).
14. Bergero, M., Bosco, L., Giacomelli, A., Angelozzi, G., Perugini, M., & Merola, C. Agrochemical contamination of honey and bee bread collected in the piedmont region, Italy. *Environments*, *8*(7), 62. (2021).
15. Piccolomini, A. M., Whiten, S. R., Flenniken, M. L., O'Neill, K. M. & Peterson, R. K. D. Acute Toxicity of Permethrin, Deltamethrin, and Etofenprox to the Alfalfa Leafcutting Bee. *J Econ Entomol* Vol. 111, pp.1001–1005 (2018).
16. Los pesticidas desorientan a las abejas. https://www.rapaluruguay.org/sitio_1/transgenicos/Maiz/pesticidas_desorientan.html.
17. Bovi, T. S., Zaluski, R. & Orsi, R. O. Toxicity and motor changes in Africanized honey bees (Apis mellifera L.) exposed to fipronil and imidacloprid. *An Acad Bras Cienc* Vol. 90, pp. 239–245 (2018).
18. González, F. B., Márquez, D. A., Solís, J. D. Á., Meraz, E. A., Aguilar, O. A., Bastidas, P. D. J. B., ... & Kubiak, S. M. W. Los plaguicidas altamente peligrosos en México. *Texcoco: RAPAM*. (2015).

AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE BACTERIAS PROMOTORAS DECRECIMIENTO VEGETAL EN CULTIVOS AGRICOLAS

Julieta Pérez Martínez[1], Virginia Ortiz Timoteo[1], Patricia González Granados[1], María Fernanda Vázquez Ramírez[2], Oscar Jesús Ortiz Arrazola[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/ITS Abasolo. Blvd. Cuitzeo de los Naranjos #401, Col. Cuitzeo de los Naranjos Abasolo, Guanajuato, C.P 36976. [2]Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Guanajuato. Avenida Siglo XXI 1156, Predio Los Sauces. C.P. 36547, Irapuato, Guanajuato.
*oscar.oa@abasolo.tecnm.mx.

RESUMEN

Las bacterias benéficas son un grupo predominante de microorganismos en el suelo que tiene la capacidad de biorremediar, regular interacciones, brindar soporte y materias primas, descomponer materia orgánica, reciclar nutrientes e incluso defender a las plantas produciendo metabolitos contra los fitopatógenos [1, 9, 17]. Sin embargo, aún hay mucho que dilucidar sobre sus propiedades, pues hay cepas que son multifuncionales. El objetivo de esta investigación consistió en aislar y caracterizar mediante pruebas bioquímicas a bacterias nativas del Estado de Guanajuato con potencial benéfico para las plantas. Para ello se tomaron muestras de cinco suelos agrícolas de dos municipios con importante actividad agrícola. Las muestras fueron procesadas e inoculadas en medios selectivos, de dónde se eligieron colonias al azar que se sembraron en medios sólidos de zinc, potasio y fósforo para determinar cualitativamente su potencial de solubilización. Además, se les realizó la prueba de ácido indolacético (AIA). Se lograron identificar aislados bacterianos capaces de solubilizar nutrientes no disponibles para las plantas de forma natural, 41 colonias solubilizadoras de fósforo, 42 de potasio y 15 de zinc. También se detectaron a 12 colonias positivas a la producción de AIA. Los resultados obtenidos son significativos pues la caracterización de cepas nativas de la zona y las propiedades benéficas para la planta encontradas, les confieren potencial para que puedan ser utilizadas a futuro en pro de la agricultura regional.

INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de fertilizantes y pesticidas para aumentar la producción agrícola provocan degradación y cambios en la estructura física, química y biológica del suelo.[2] Para aminorar los daños adversos, los insumos de origen biológico como bioinsecticidas y biofertilizantes, constituyen una alternativa amigable con los factores bióticos y abióticos[18]. Además, algunos de los microorganismos que constituyen estos insumos, pueden favorecer a las plantas a través de mecanismos directos o indirectos. El grupo de microorganismos mayormente distribuido y abundante en los suelos agrícolas, son las bacterias. Estas se clasifican en dos grupos, las antagonistas de fitopatógenos y las promotoras de crecimiento[6]. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) incrementan el desarrollo de la planta mediante fijaciones y solubilizaciones.[13, 14] Estudiar los mecanismos de las BPCV, permite conocer el qué y cómo realizan sus funciones en favor de las plantas.[6]

TEORÍA

Los microorganismos benéficos tienen la capacidad de desarrollarse en distintos hábitats y en conjunto con otros seres vivos.[8, 11] Utilizan diferentes mecanismos como oxidaciones, reducciones y precipitaciones[10, 12] que pueden favorecer a su entorno. El suelo es el hábitat más rico y diverso en microorganismos benéficos. Debido a sus múltiples propiedades y al potencial que tienen dentro de la agricultura, la bioprospección ha sido pilar en el aprovechamiento de los microorganismos benéficos, pues su aislamiento, estudio y utilización permite reducir el uso de insumos sintéticos y la realización de prácticas no sustentables frecuentemente empleadas en la agricultura convencional.

Como se mencionó, en el suelo, existe una amplia variedad de microorganismos benéficos como hongos, virus, protozoarios, bacterias, etcétera[19]. Este último grupo, ha sido el más aprovechado en la agricultura de bioprospección. Por ejemplo, hay bacterias que enferman a los insectos fitófagos

evitando que causen daño a las plantas; bacterias antagonistas de fitopatógenos, que interfieren en la biología de los patógenos aminorando el daño (agentes de biocontrol). Existen algunas otras bacterias capaces de colonizar a las plantas (endófitos)[5], y otras que facilitan la disponibilidad de nutrientes[3, 4, 15] o la síntesis de hormonas vegetales (promotoras). Cualesquiera que sean sus mecanismos de acción, las bacterias benéficas favorecen el crecimiento y desarrollo vegetal.[6, 7, 16]

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención de muestras.

Se tomaron muestras de suelo de parcelas agrícolas de las localidades Labor de López (Pénjamo, Guanajuato) y Labor de Peralta (Abasolo, Guanajuato). Se cavó una fosa de 0.3-0.4 m de profundidad y posteriormente se tomaron, aproximadamente, 30 g de suelo.

Aislamiento de colonias bacterias.

Se pesó 1 g de cada muestra colectada (báscula analítica, AIAD HR-250AZ) y se colocaron individualmente en tubos cónicos de 15 ml. Se agregaron 10 ml de agua destilada estéril. A partir de esta suspensión, se realizaron cinco diluciones seriadas con 1^{1} ,1^{10} ,1^{100}, 1^{1000}. De la última dilución, se tomaron 100 µL de cada muestra y se inocularon en placas de los medios selectivos Burk (0.2 g $MgSO_4$, 0.005 g $FeSO_4$, 0.4 g K_2HPO_4, 0.2 g KH_2PO_4, 0.002 g Na_2MoO_4, 0.008 g $CaCl_2$, 5 g de glucosa, 20 g de agar, 1000 ml de agua) y Rojo Congo (5 g de manitol, 0.2 g K_2HPO_4, 0.2 g $MgSO_4$, 0.2 g NaCl, 0.1 g KSO_4, 5 g $CaCO_3$, 20 g de agar y 1000 ml de agua). Las placas se incubaron 35 °C por 16h. Se realizó el conteo de colonias (Colony Counter App).

Tinción de Gram.

Se seleccionaron al azar 40 colonias de cada medio, Burk y Rojo Congo, por muestra. Estas fueron sembradas en 10 ml de medio líquido Ty (3 g de extracto de levadura, 6 g de peptona de caseína, 0.87 g $CaCl_2$,1000 ml de agua y pH 7.2) e incubadas por 16 h con agitación. Posteriormente, se tomaron 10 µL de cada muestra y se realizó la tinción de Gram, acorde al procedimiento descrito por Rodríguez y colaboradores (2018). Las muestras teñidas fueron observadas al microscopio (VLAB VE-BC3PLUS y CARL ZEISS Primo Start).

Solubilización P, K y Zn.

Las colonias Gram positivas se sembraron en medio Ty y se incubaron bajo las mismas condiciones reportadas. Posteriormente se tomaron 10 µL de cada aislado y se inocularon por triplicado en los medios de cultivo de fósforo (0.5 g de extracto de levadura, 10 g de glucosa, 5 g $CaPO_4$, 0.5 g $(NH_4)_2SO_4$, 0.02 g KCl, 0.01 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.00001 g $MnSO_4$, 0.0001 g $FeSO_4$, 0.1 g de purpura de bromocresol, 15 g de agar, 1000 ml de agua destilada y pH 7.2); potasio (0.5 de extracto de levadura, 10 g de glucosa, 0.5 g KNO_3, 0.5 gr $(NH_4)_2SO_4$, 0.2 g KCl, 0.1 g $MgSO_4$, 0.0001 g $MnSO_4$, 0.0001 g $FeSO_4$, 0.002 g verde de bromocresol, 15 g de agar, 1000 ml de agua destilada y pH 7.2); y zinc (10 g de glucosa, 0.06 g TRIS, 4.68 g NaCl, 1.49 g KCl, 1.07 g de NH_4Cl, 0.43 g de sulfato de sodio, 0.2 g de $MgCl_2$, 30 mg $MgCl_2$, 1 g de óxido de zinc, 15 g de agar, 1000 ml de agua destilada y pH de 7.2). Las placas se incubaron por 48 h a 35 °C y se midió la actividad de solubilización con la presencia del halo.

Producción de Ácido indol-acético (AIA)

Las colonias Gram positivas de cada muestra, también se sembraron en tubos cónicos de 50 ml con 2ml de medio mínimo complementado con triptófano (Na_2MoO_4 0.01 g, Tris HCl 6 g, NH_4Cl 5.0 g, NaCl 28 g, 1000 ml de agua, pH 7.0, 2mM $MgSO_4$, 400 mM $CaCl_2$, 11 mM Glucosa, 30 mM K_2HPO_4, 50 mM $FeCl_3$ y 0.98 mM 2-Triptofano) y se incubaron por 72 h con agitación y oscuridad. Posteriormente, se centrifugaron a 6000 rpm por 10 min para recuperar los sobrenadantes.
Se tomó 1 ml de cada muestra, se centrifugaron bajo las mismas condiciones y se conservaron las pastillas. A estas se les adicionó 1 ml de solución Salkowski (12 g de $FeCl_3$, 429 ml de H_2SO_4 y 571

ml de H_2O) y se incubaron en condiciones de oscuridad por una hora a temperatura ambiente. Después se midió la densidad óptica a 535 nm.

RESULTADOS

Aislamiento de colonias

Se aislaron 103 colonias en la muestra 1 (M1), 560 en la muestra 2 (M2), 500 en la muestra 3 (M3), 1608 en la muestra 4 (M4) y 484 en la muestra 5 (M5). En la tabla 1, se especifica el número de colonias aisladas por muestra de suelo en cada medio dónde se inocularon. Mientras que en la figura 1, se observan las colonias aisladas en el medio Burk (izquierda) y en el medio Rojo Congo (derecha) a partir de la muestra de suelo 2.

Tabla 1. Colonias bacterianas aisladas en medio Burk y Congo Rojo por muestra de suelo

Muestra de suelo	Medios de cultivo	
	Burk	Rojo Congo
1	56	47
2	292	268
3	264	236
4	810	798
5	233	251

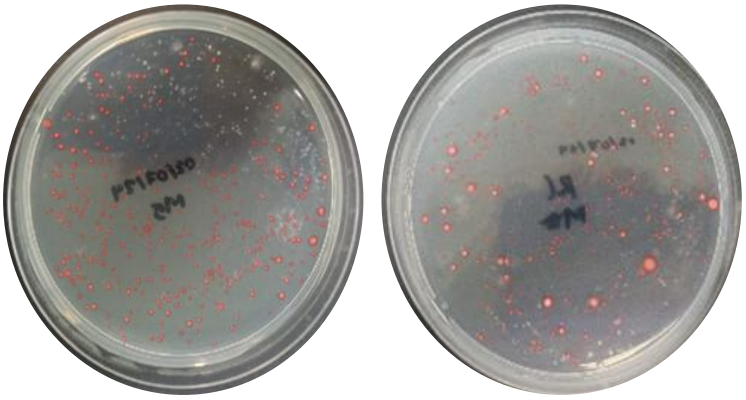


Figura 1. Colonias bacterianas aisladas de la muestra de suelo 2. Izquierda: medio Burk. Derecha: medio Congo Rojo.

Tinción de Gram

De las 40 colonias seleccionadas al azar de cada medio de cultivo y muestra de suelo, se obtuvieron 79:1 colonias positivas:negativas para la M1, M3 y M4; y 80 colonias positivas para la M2 y M5 (figura 2). En las figuras 3 y 4, se muestra la relación de colonias Gram positivas y Gram negativas encontradas por muestra de suelo en los medios Burk y Congo Rojo, respectivamente.

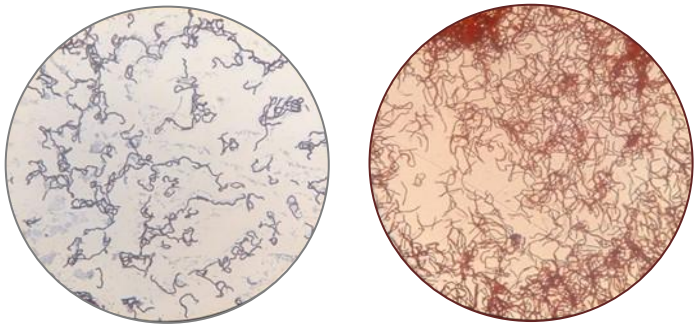


Figura 2. Tinción de Gram. Izquierda: bacterias Gram positivas del aislado 16, M5 medio Congo Rojo. Derecha: bacterias Gram negativas del aislado 14, M1 medio Congo Rojo.

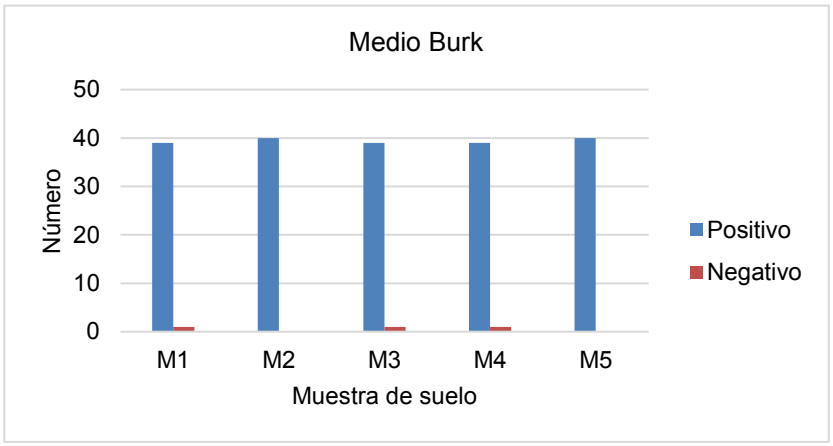


Figura 3. Número de colonias Gram positivas y negativas obtenidas por muestra de suelo en medio Burk.

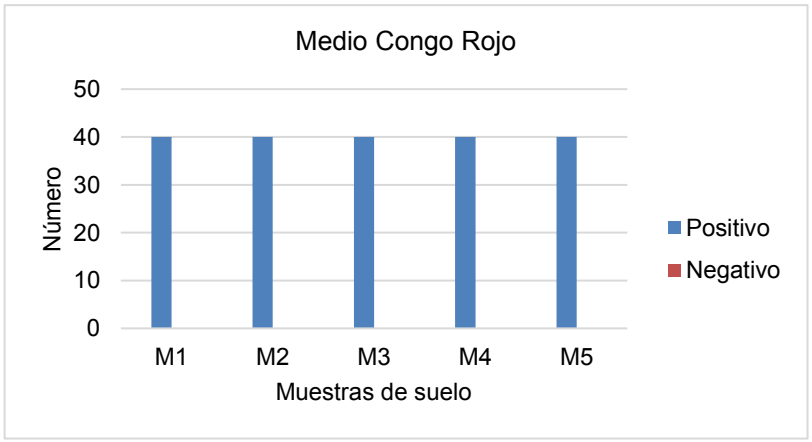


Figura 4. Número de colonias Gram positivas y negativas obtenidas por muestra de suelo en medio Rojo Congo.

Solubilización de Fósforo

En la M1 se obtuvieron 5 aislados con actividad de solubilización de P; en la M2, 9 aislados; M3, 6 aislados, M4, 14 aislados; y en la M5, 9 aislados. En la figura 5, se observa el número de aislados con potencial de solubilización de P encontrados por muestra y medio de cultivo. El diámetro de los halos de solubilización observados osciló desde los 4 hasta los 26 mm, siendo los aislados en el medio Burk (M1, M2 y M4) los que mayor tamaño presentaron. La actividad de solubilización de P, se puede observar en los halos amarillos encontrados en la M3 tanto en el medio Burk como en Congo Rojo (Figura 6).

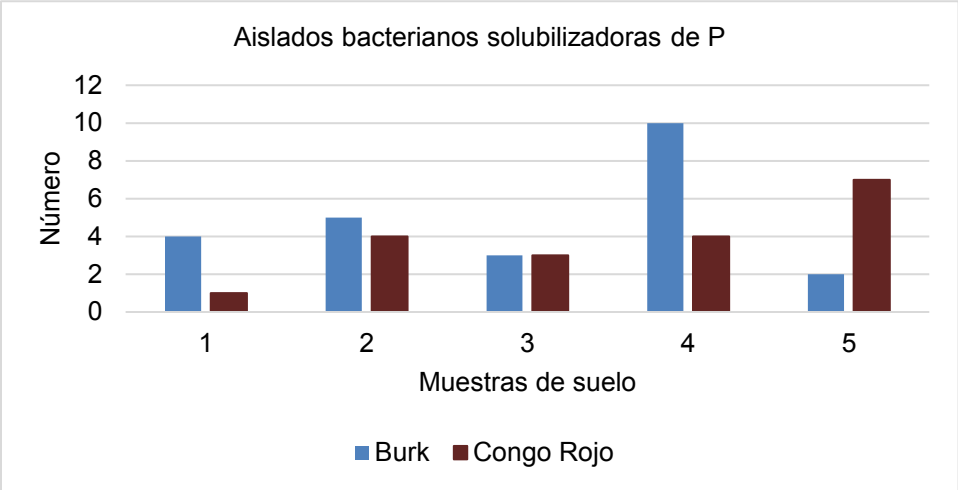


Figura 5. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de fósforo encontrados en los medios Burk y Rojo Congo.

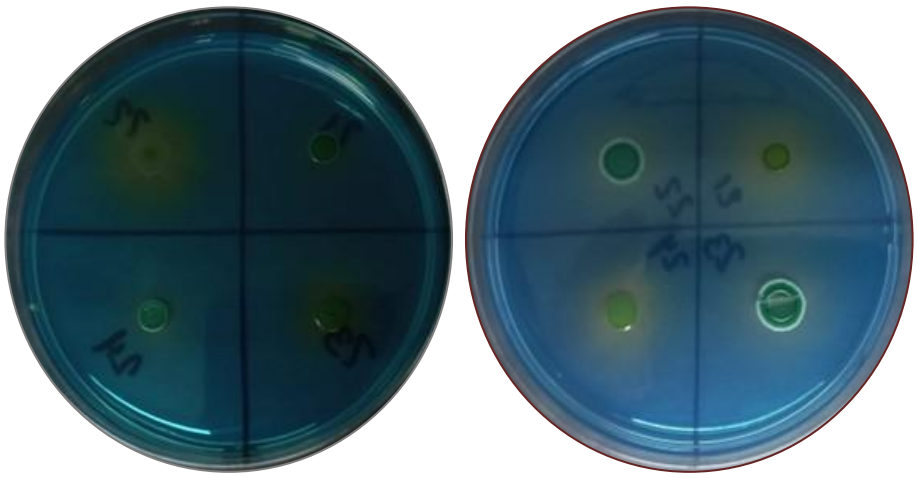


Figura 6. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de P, M3. Izquierda, medio Burk. Derecha, medio Rojo Congo.

Solubilización de Potasio

En la M1 se obtuvieron 2 aislados con actividad de solubilización de K; en la M2, 15 aislados; M3, 5 aislados, M4, 9 aislados; y en la M5, 5 aislados. En la figura 7, se observa el número de aislados con

potencial de solubilización de K encontrados por muestra y medio de cultivo. El diámetro de los halos de solubilización observados, osciló desde los 4 hasta los 20 mm, siendo los aislados en el medio Burk M1 y M2; y medio Rojo Congo M4 los que mayor tamaño presentaron. La actividad de solubilización de K, se puede observar en los halos amarillos encontrados en la M3 tanto en el medio Burk como en Congo Rojo (Figura 6).

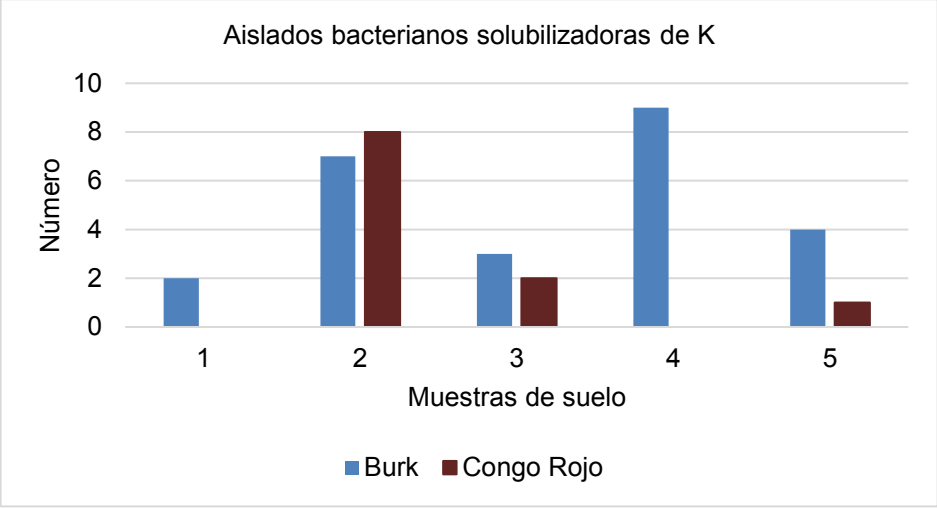


Figura 7. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de potasio encontrados en los medios Burk y Rojo Congo.

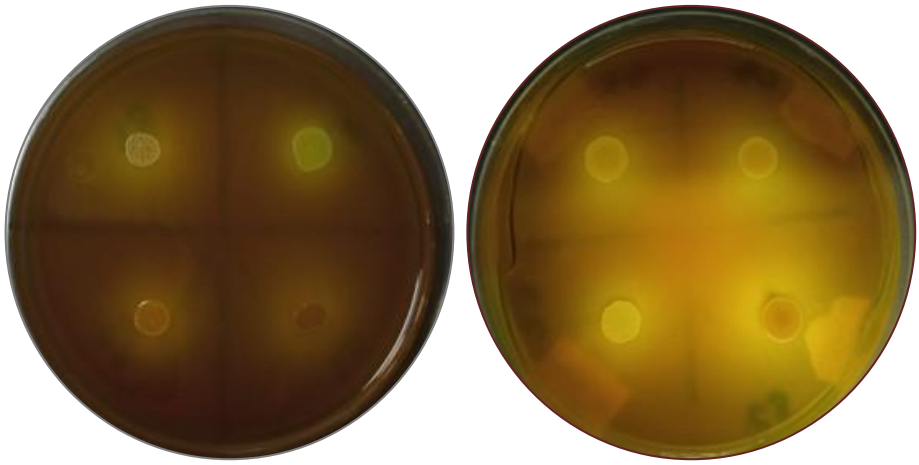


Figura 8. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de K. Izquierda, M2 medio Rojo Congo. Derecha, M1 medio Burk.

Solubilización de Zinc

En la M1 no se detectaron aislados con capacidad de solubilizar Zn; en la M2, se encontraron 2 aislados; en la M3, 5 aislados; en la M4 3; y en la M5, 2. En la figura 9, se observa el número de aislados con potencial de solubilización de Zn encontrados por muestra y medio de cultivo. El diámetro del halo de solubilización (transparente) observado osciló entre los 2 y 8 mm de diámetro, siendo los aislados de la M3 los de mayor tamaño.

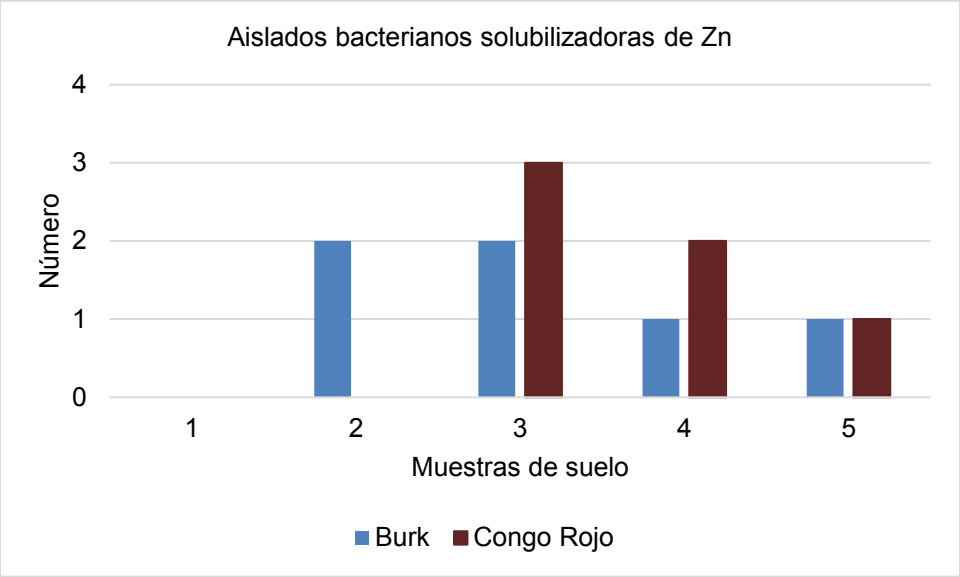


Figura 8. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de potasio encontrados en los medios Burk y Rojo Congo.

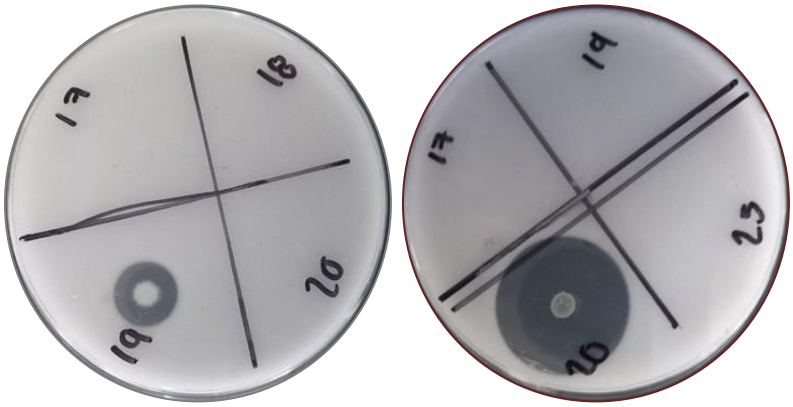


Figura 9. Aislados bacterianos con actividad de solubilización de Zn. Izquierda, M3 en medio Burk. Derecha, M3 en medio Congo Rojo.

Producción de Ácido indol-acético (AIA)

Se identificaron 3 aislados con capacidad de síntesis de AIA en la M1, 5 aislados en la M2, y 4 aislados en la M3. En las muestras 4 y 5 no se identificó ninguna colonia con capacidad de sintetizar AIA. En la tabla 2, se especifica el número de colonia, la muestra de suelo de dónde se obtuvo y la producción, en ppm, de AIA. Los aislados dónde se observó la síntesis de esta hormona vegetal mostraron una coloración rosa (figura 11).

Tabla 2. Colonias bacterianas con capacidad de síntesis de ácido indol-acético

Muestra	Colonia	Medio	Absorbancia	AIA (ppm)
M1	1	Burk	0.212	10.47
M1	3	Burk	0.389	22.77
M1	4	Burk	0.356	20.47
M2	2	Burk	0.225	11.38
M2	3	Burk	0.349	19.99
M2	20	Burk	0.262	13.95
M2	12	Congo R	0.209	10.27
M2	30	Congo R.	0.264	14.09
M3	30	Congo R.	0.591	36.79
M3	36	Congo R.	0.354	20.34
M3	11	Burk	0.301	16.66
M3	19	Burk	0.442	26.45

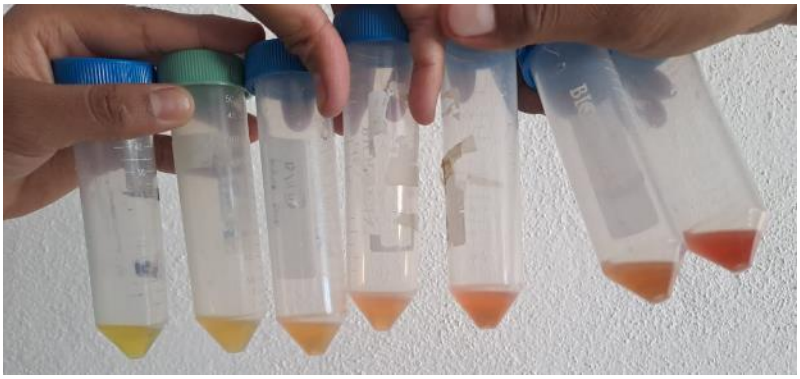


Figura 11. Comparación cualitativa de aislados bacterianos con capacidad de síntesis de AIA. De izquierda a derecha: la coloración amarilla índica una baja o nula síntesis, mientras que el color rosa demuestra una alta producción.

CONCLUSIONES

En esta investigación se identificaron colonias bacterianas nativas de suelos agrícolas del Estado de Guanajuato con potencial para la solubilización de fósforo, potasio y zinc; así como para la producción de ácido indolacético. A través de distintas pruebas bioquímicas, se logró aislar a aquellas cepas que pueden contribuir indirectamente al crecimiento vegetal con procesos como la solubilización, acidificación y fijación; o bien, directamente, mediante la liberación de ácidos orgánicos para facilitar la absorción de fosfatos y la producción de AIA para la estimulación de las raíces. La información recabada en esta investigación abre un panorama más certero sobre la utilización y/o aprovechamiento de los microorganismos nativos para la mejora del campo mexicano.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Barros-Rodríguez, P. Rangseekaew, K. Lasudee, W. Pathom-Aree, & M. Manzanera, Impacts of agriculture on the environment and soil microbial biodiversity. Plants, Vol 10, 11, 2021, 2325.
2. C. Jiménez, N. Sanabria de Albarracin, G. Altuna y M. Alcano, “Efecto de *Trichoderma harzanium* (Rifai) sobre el crecimiento de plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.).” Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia, Vol 28, 2011, pp. 1-10.
3. C. Loredo-Ostil, L. López-Reyes, D. Espinosa-Victoria, "Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociados con gramíneas", TERRA Latinoamericana, Vol 22, 29, 2004, pp 225-239.
4. D. Molina-Romero, M. R. Bustillos-Cristales, O. Rodríguez-Andrade, Y. E. Morales-García. Y. Santiago-Saenz. M. Castañeda-Lucio y J. Muñoz-Rojas, "Mecanismos de Fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico", Revista de las DES Ciencias Agropecuarias, Vol 17, 2, 2015, pp 24-34.
5. D. S. Pardo, M. D. C. Mazo y T. D. F. Rojas, "Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma y perspectiva”. En B. R. Bonilla, L. E. González de Bashan y R. O. Pedraza, (Primera edición), “Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en sistema de agricultura sostenible", AGROSAVIA, 2021, pp 46-77.
6. F. H. González y M. N. Fuentes, "Mecanismos de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal", Revista de Ciencias Agrícolas, Vol 34, 2, 2016, pp. 17-31.
7. F. M. A. Luna y R. J. R. Mesa, “Microorganismos eficientes y sus beneficios para los agricultores”, Revista científica Agroecosistemas, Vol 4, 2, 2016, pp. 31-40.
8. I. F. R. Pares y G. A. Juárez. "Bioquímica de los microorganismos", REVERTÉ S. A. 2020. https://books.google.es/books?id=pJUJEAAAQBAJ&lpg=PR1&ots=kicWCjJekv&dq=microorganismos%20&lr&hl=es&pg=PR1#v=onepage&q=microorganismos&f=false
9. J. Köninger, P. Panagos, A. Jones, M.J.I. Briones, & A. Orgiazzi, In defence of soil biodiversity: Towards an inclusive protection in the European Union. Biological Conservation, 268, 2022, 109475. S. Jiao, Y. Lu, & G. Wei, Soil multitrophic network complexity enhances the link between biodiversity and multifunctionality in agricultural systems. Global Change Biology, Vol 28, 1, 2022, pp 140-153.
10. M. A. Ramírez Martínez, “Tecnología de microorganismos efectivos (EM) aplicada a la agricultura y medio ambiente sostenible”, [Tesis de licenciatura, Universidad industrial de Santander de Bucaramanga, 2006.
11. P. Vega-Celedón, M. H. Chanchignia, M. González, M. Seeger, “BIOSÍNTESIS DE ÁCIDO INDOL-3-ACÉTICO Y PROMOCIÓN DEL CRECIMIENTO POR BACTERIAS”, Cultivo Tropicales Vol *37*, 2016, pp 33-39.
12. R. M. Atlas, "Diversity of Microbioal Communities, En: K. C. Marshall. (Ed), Diversidad de comunidades microbianas", Plenium, New York, Vol 7, 1984, pp 1-47.
13. R. M. Camelo, M. S. P. Vera, B. R. R. Bonilla, “Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal”, Revista Corpioca – Ciencia y Tecnología Agropecuaria, Vol 12, 2, 2011, pp. 159-166.
14. R. M. M. Badia, T. B. Hernández, L. J. A. Murrel, J. Mahillon, y H. M. Pérez, “Aislamiento y caracterización de cepas de *Bacillus* asociadas al cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.)”, Revista Brasileira Agroecología, Vol 6, 1, 2011, pp. 90-99.
15. S. C. García, “Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno”, Gran Enciclopedia Universal, Vol 9, 3, 2011, pp. 173-186.
16. S. Compant, B. Reiter, A. Sessitsch, J. Nowak, C. Clément & E. Ait Barka, "Endophytic Colonization of Vitis vinífera L. by Plant Growth-Promoting Bacterium Burkholderia sp. Strain PsJN”, Appled and Enviromental Microbiology. Vol 71, 4, 2005, pp. 1685 - 1693.
17. S. Jiao, Y. Lu, & G. Wei, Soil multitrophic network complexity enhances the link between biodiversity and multifunctionality in agricultural systems. Global Change Biology, Vol 28, 1, 2022, pp 140-153.

18. T. A. Elein, A. Leyva y A, Hernández, “Microorganismos benéficos como Biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicum suculentum* Mill)” Revista Colombiana de Biotecnología, Vol 7, 2005, pp. 47-54.
19. W. F. Viera-Arroyo, “Rol de los microorganismos benéficos en la agricultura sustentable”, Journal of the Selva Andina Biosphere, Vol 8, 2, 2020, pp 67-68.

USO DE RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES PARA MINIMIZAR LA DEGRADACIÓN DE CLOROFILA EN CHILES ASADOS

Giovanna Rossi-Márquez[1], Cristian Aarón Dávalos Saucedo[2], Edgardo Martínez Orozco[3], Sergio Rodríguez Miranda[4], Carlos E. Castañeda[5]

[1-4]Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Lagos de Moreno, Jalisco [5]Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, Lagos de Moreno, Jalisco, México.
giovanna.rossi@lagos.tecmm.edu.mx

RESUMEN

México es uno de los principales productores de chiles del género *Capsicum annuum*, con más de 150 variedades que desempeñan un papel clave en la gastronomía y la industria alimentaria. Sin embargo, el proceso de asado puede reducir significativamente el contenido de clorofila, un compuesto con propiedades antioxidantes, antimutagénicas y anticancerígenas. Para mitigar esta pérdida, se han desarrollado recubrimientos comestibles, destacando aquellos formulados con aislado de suero de leche, los cuales han demostrado mejorar la estabilidad y vida útil de diversos alimentos. En este estudio, se evaluó la aplicación de un recubrimiento proteico elaborado a partir de proteínas de suero de leche para preservar la clorofila en chiles asados. El recubrimiento se aplicó mediante la técnica de inmersión que consiste en sumergir las muestras de chile en la solución de recubrimiento durante cinco minutos antes del proceso de asado, el cual se realizó siguiendo la técnica tradicional de cocina al colocar las muestras directamente en una plancha de metal caliente. Posteriormente, se cuantificó el contenido de clorofila mediante espectrofotometría a longitudes de onda de 645 y 663 nm. Como control, se utilizaron muestras tratadas con agua destilada para igualar las condiciones de humedad del recubrimiento proteico. Los resultados mostraron que los chiles asados con el recubrimiento proteico conservaron una concentración de clorofila total de 2.59 µg/g, mientras que las muestras control presentaron una concentración de 1.33 µg/g. Esto evidencia el efecto barrera del recubrimiento, logrando preservar un 44% de la clorofila total ($p < 0.05$). El uso de recubrimientos proteicos a base de suero de leche representa una estrategia eficaz para reducir la degradación de compuestos bioactivos durante el procesamiento térmico, contribuyendo a la preservación del color y del valor nutricional de los chiles asados. Estos hallazgos tienen aplicaciones potenciales en la industria alimentaria, especialmente en la exportación y comercialización de productos mínimamente procesados.

INTRODUCCIÓN

México es un país clave en la producción de frutos del género *Capsicum annuum*, conocidos comúnmente como chiles, los cuales tienen un papel fundamental no solo en la gastronomía, sino también en la identidad cultural del país. Se cultivan alrededor de 150 variedades, valoradas tanto por sus propiedades culinarias como por sus aplicaciones en otras industrias, como la textil y la farmacéutica [1].

En muchas regiones del país, el chile es consumido asado, un proceso que realza su sabor y características organolépticas. Sin embargo, este tratamiento térmico puede generar la pérdida de compuestos bioactivos, como la clorofila, un pigmento vegetal asociado a beneficios para la salud por su capacidad antioxidante, antimutagénica y anticancerígena. Su estructura química le permite neutralizar radicales libres, proteger el ADN y modular procesos celulares implicados en enfermedades crónicas [2].

Frente a este reto, la investigación reciente ha explorado el uso de recubrimientos comestibles como una alternativa eficaz para mejorar la vida útil y conservar las propiedades nutricionales de los alimentos [3]. Estos recubrimientos, diseñados para consumirse junto con el producto, están elaborados con compuestos naturales como proteínas y carbohidratos, muchos de ellos provenientes de subproductos de la industria alimentaria [4–6]. Su formulación depende de factores como el tipo de alimento, el proceso térmico al que será sometido y las propiedades deseadas del recubrimiento.

Los recubrimientos a base de proteínas han sido ampliamente estudiados debido a sus buenas propiedades mecánicas y su capacidad para formar barreras funcionales [7–9]. En este contexto, México, al ser un importante productor de leche, genera grandes volúmenes de suero lácteo, un subproducto con alto potencial para el desarrollo de recubrimientos comestibles. Su uso no solo representa una estrategia sustentable, sino que también permite mejorar de manera natural las características del alimento, como su textura, estabilidad y contenido nutricional [10, 11].

Particularmente, las proteínas del suero de leche han mostrado resultados prometedores en alimentos fritos, al reducir la absorción de aceite y la pérdida de agua. Cuando se aplican a frutos de *Capsicum annuum*, estos recubrimientos podrían ayudar a conservar la clorofila durante el asado, un factor clave no solo para mantener el valor nutricional, sino también para preservar el color, que influye directamente en la aceptación del consumidor [4, 8, 12, 13].

TEORÍA

En muchas culturas del mundo, la fritura profunda es parte esencial de la tradición culinaria, ya que permite realzar el sabor, el color y la textura de los alimentos. Sin embargo, este método implica una serie de transformaciones fisicoquímicas que deben considerarse. Durante la fritura, el alimento se sumerge en aceite comestible a altas temperaturas, lo cual genera un calentamiento rápido y uniforme [5]. Este incremento de temperatura provoca la evaporación del agua contenida en el alimento, lo que deja poros en su estructura que luego son ocupados por el aceite [14]. Aunque este proceso es clave para lograr una textura crujiente y un sabor característico, el resultado es un alimento con alto contenido de grasa, lo que representa un desafío para la salud pública.

Ante este panorama, una alternativa natural y funcional es la aplicación de recubrimientos comestibles, los cuales pueden actuar como una barrera que disminuye la absorción de grasa durante la fritura. Estos recubrimientos no están diseñados para reemplazar por completo los materiales de empaque tradicionales, sino para complementar sus funciones y, en muchos casos, mejorar las propiedades del alimento y prolongar su vida útil [3]. Se trata de una película delgada que se adhiere a la superficie del alimento y que, gracias a sus propiedades mecánicas, puede mantenerse intacta durante el proceso térmico. Para mejorar su flexibilidad y evitar fracturas, se pueden añadir plastificantes naturales, que además reducen el tamaño de los poros [15]. Estas películas pueden desarrollarse a partir de proteínas, carbohidratos o lípidos, considerando siempre las características específicas del alimento para asegurar la viabilidad del recubrimiento.

Las proteínas derivadas del suero de leche han demostrado un desempeño destacado en la elaboración de recubrimientos y películas comestibles [11,16,17]. En alimentos fritos, estos compuestos forman una barrera que limita la pérdida de agua por evaporación y, con ello, la absorción de aceite. En el caso particular de los frutos del género *Capsicum annuum*, es importante evaluar también la conservación de la clorofila, ya que este pigmento, además de aportar valor nutricional, influye de forma directa en la apariencia del alimento. La pérdida de color durante el procesamiento puede afectar la aceptación del consumidor [11,18,19,20], por lo que es esencial considerar parámetros como el contenido de agua, la pérdida de humedad, el nivel de grasa absorbida y la concentración de clorofila antes y después del tratamiento térmico.

PARTE EXPERIMENTAL

a) Diseño y desarrollo del recubrimiento comestible.
Para la preparación del recubrimiento, se elaboró una solución a base de proteínas de suero de leche. Se disolvieron 9 gramos de aislado de proteína de suero (GNC, USA) en 125 ml de agua destilada. A esta mezcla se incorporaron 5 gramos de sorbitol no cristalizable como plastificante. Posteriormente, la solución se calentó a 90 °C durante 20 minutos con el fin de favorecer la desnaturalización de las proteínas. Una vez transcurrido ese tiempo, la mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta su uso.

b) Preparación del alimento
Antes de aplicar el recubrimiento, los frutos fueron sometidos a un proceso de limpieza para eliminar impurezas visibles como tierra, utilizando agua corriente. Posteriormente, se desinfectaron mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio (0.1 g/L) durante 5 minutos, y se dejaron secar al aire a temperatura ambiente. Una vez secos, los frutos fueron cortados en piezas de aproximadamente 2 × 2 cm y se almacenaron bajo refrigeración hasta el momento de su uso.

c) Aplicación del recubrimiento
Las piezas de fruto fueron sumergidas en la solución de recubrimiento durante 5 minutos y, posteriormente, se dejaron escurrir durante 10 minutos para eliminar el exceso de solución. Con el fin de igualar las condiciones de humedad aportadas por el recubrimiento, se preparó un grupo control en el que las muestras se sumergieron únicamente en agua destilada bajo el mismo protocolo.

d) Proceso de asado
las muestras fueron colocadas sobre una plancha metálica precalentada (comal)**,** donde se sometieron a cocción durante aproximadamente 3 minutos, girándolas de manera uniforme hasta alcanzar un color dorado en la superficie**,** indicativo del punto de asado deseado.

e) Cuantificación de clorofila
El contenido de clorofila se determinó siguiendo el método descrito por Ruiz-Santiago [13], utilizando un espectrofotómetro. Para ello, se trituraron finamente 0.5 gramos de muestra, los cuales se maceraron en un mortero con 5 ml de acetona al 80 %, hasta lograr una completa extracción del pigmento. El extracto se centrifugó y el sobrenadante se ajustó a un volumen final de 6 ml con acetona al 80 %. Luego, se tomaron 0.5 ml del sobrenadante y se diluyeron hasta 5 ml con la misma solución. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro a 645 y 663 nm, utilizando acetona al 80 % como blanco.
La concentración de clorofila se calculó con las siguientes fórmulas:

- Clorofila a = $(12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645})$
- Clorofila b = $(22.9 \times A_{645}) - (4.68 \times A_{663})$
- Clorofila total = $(20.2 \times A_{645}) - (8.02 \times A_{663})$

RESULTADOS

La clorofila desempeña un papel fundamental en los alimentos, no solo por ser responsable del característico color verde de los vegetales, sino también por sus propiedades funcionales con efectos positivos sobre la salud humana. Como se observa en la figura 1, la concentración de clorofila tipo A disminuye de forma considerable tras el proceso de asado. No obstante, la aplicación de un recubrimiento comestible elaborado a base de proteínas de suero contribuye a atenuar esta pérdida, probablemente debido a su capacidad para formar una barrera física que protege la superficie del alimento frente al entorno y al impacto térmico directo [21 -22].

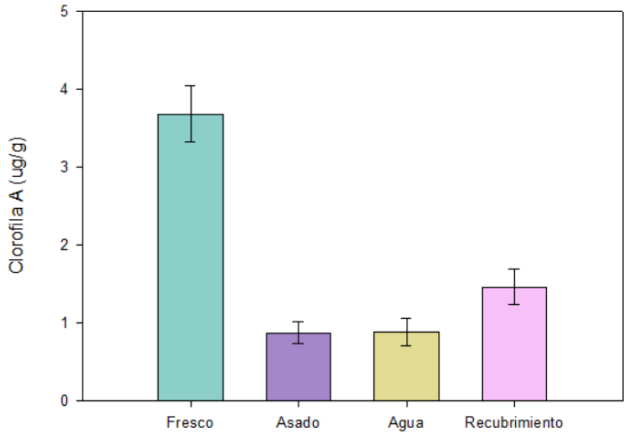


Figura 1. Contenido de clorofila A en las muestras analizadas**.**

Un comportamiento similar se observa en los niveles de clorofila tipo B (figura 2)**,** donde tanto el recubrimiento elaborado con agua como aquel formulado con proteínas de suero favorece la conservación parcial de este pigmento vegetal, al compararse con las muestras sin recubrimiento [22-23].

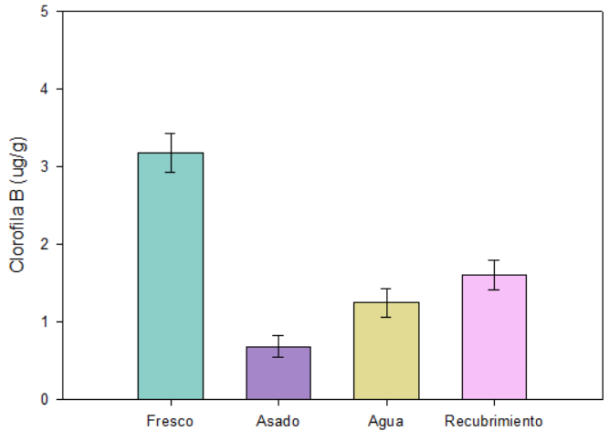


Figura 2. Contenido de clorofila B en las muestras analizadas.

En cuanto al contenido total de clorofila (figura 3), se confirma una disminución significativa como resultado del tratamiento térmico. Sin embargo, el uso del recubrimiento proteico mitiga los efectos del calor, permitiendo preservar una mayor proporción de clorofila. Investigaciones previas respaldan la eficacia de los recubrimientos comestibles en la retención de clorofilas y otros compuestos bioactivos durante procesos térmicos [22, 24, 25].

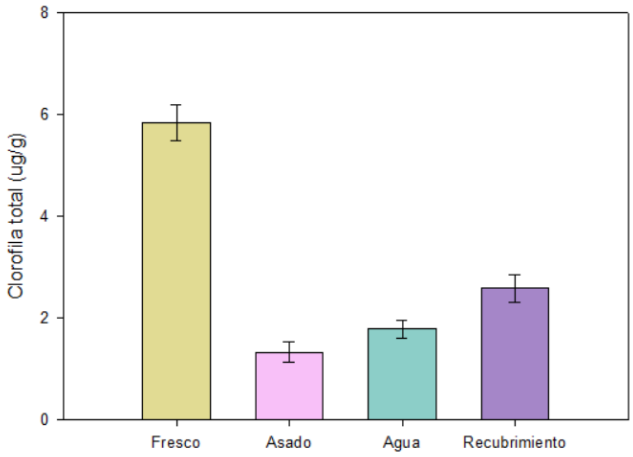


Figura 3. Contenido de clorofila total en las muestras analizadas.

Si bien estos resultados son prometedores, la información científica sobre el efecto específico de los recubrimientos comestibles en la conservación de los distintos tipos de clorofila aún es limitada. Por ello, se requieren estudios adicionales que permitan profundizar en el conocimiento de sus mecanismos de acción y contribuyan a optimizar su diseño y aplicación en alimentos sometidos a cocción.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de recubrimientos comestibles a base de proteínas de suero de leche es una estrategia efectiva para reducir la pérdida de clorofila en frutos de *Capsicum annuum* durante el proceso de asado. Este tipo de recubrimiento actúa como una barrera protectora que minimiza el impacto térmico y contribuye a preservar tanto el color como el valor nutricional del alimento. Si bien los hallazgos son prometedores, es necesario continuar investigando los mecanismos involucrados y optimizar las formulaciones para su aplicación en diferentes matrices alimentarias.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Lomelí, “Arte de cocinar con chile”, México: Editorial Contenido, SA de CV., 1991.
2. T. Martins, A.N. Barros, E. Rosa, L. Antunes, L. “Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: A comprehensive review”, Molecules, 28(14), 5344, 2023, 2023
3. M. García, V. Bifani, C. Campos, M. Martino, P. Sobral, S. Flores, F. Menegalli, “Edible coating as an oil barrier or active system” Food engineering: Integrated approaches, New York, NY., Springer, 2008, pp. 225-241.
4. M. Ali, A. Parmar, G. Niedbała, T. Wojciechowski, A. Abou El-Yazied y H. El-Gawad, “Improved shelf- life and consumer acceptance of fresh-cut and fried potato strips by an edible coating of garden cress seed mucilage” Foods, vol. 10, nº 7, pp. 1536 - 1546.
5. L. Hashim, A. Ropi, A. Alikasturi, M. Anuar, N. Safiei, I. Muhamad y S. Shaharuddin, “Fat blockage and improved characteristics of Coated-Cassava chips using natural edible coating from carboxymethyl cellulose in Deep-F” Materials Today: Proceedings, vol. 31, pp. A85-A89., 2020.
6. D. Ananey-Obiri, L. Matthews, M. Azahrani, S. Ibrahim, C. Galanakis y R. Tahergorabi, “Application of protein-based edible coatings for fat uptake reduction in deep-fat fried foods

with an emphasis on muscle food proteins" Trends in Food Science & Technology, vol. 80, pp. 167-174, 2018.
7. D.D.Freitas, P. Berbari, P. Prati, F. Fakhouri, F. Queiroz, E. Vicente, "Reducing fat uptake in cassava product during deep-fat frying," J Food Eng, vol. 94, nº 3, pp. 390-394, 2009.
8. S. Trujillo-Agudelo, A. Osorio, F. Gómez, J. Contreras-Calderón, M. Mesías-Garcia, C. Delgado- Andrade, F. Morales y O. Vega-Castro, "Evaluation of the application of an edible coating and different frying temperatures on acrylamide and fat content," J Food Proc Eng, vol. 43, nº 5, p. e13198, 2019.
9. P. Di Pierro, G. Rossi-Márquez, L. Mariniello, A. Sorrentino, R. Villalonga, R. Porta, "Effect of Transglutaminase on the Mechanical and Barrier Properties of Whey Protein/Pectin Films Prepared at Complexation pH", J Agri Food Chem (19), 4593-4598, 2003.
10. J. Królczyk, T. Dawidziuk, E. Janiszewska-Turak y B. Sołowiej, "Use of Whey and Whey Preparations in the Food Industry – a Review," Pol J Food Nutr Sci, vol. 66, nº 3, 2016.
11. M. Angor, "Reducing fat content of fried potato pelletchips using carboxymethyl cellulose and soy protein isolate solu-tions as coating films," J Agri Sci, vol. 8, p. 162–168, 2016.
12. B. Rojas, "Degradación de clorofilas y carotenoides durante la elaboración de aceitunas verdes de mesa (Doctoral dissertation)," Universidad de Sevilla, Sevilla, 1992.
13. F. Ruiz-Santiago, Ruiz, B. Hernández, R. García y A. Valadez, "Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco," 2019. [En línea]. Available: http://www. fcb. uanl. mx/IDCyTA/files/volume4/4/10/126.pdf.
14. N. Montes, I. Millar, R. Provoste, N. Martínez, D. Fernández, G. Morales y R. Valenzuela, "Absorción de aceite en alimentos fritos", Revista chilena de nutrición, vol. 43, nº 1, pp. 87-91, 2016.
15. M. Kurek y M. Ščetar, "Edible coatings minimize fat uptake in deep fat fried products: A review", Food Hydrocolloids, vol. 71, pp. 225-235.
16. G. Rossi Marquez, P. Di Pierro, M. Esposito, L. Mariniello y R. Porta, "Application of transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin films as water barrier coatings in fried and baked foods", Food and Bioprocess Technology, vol. 7, nº 2, pp. 447-455, 2014.
17. K. Adrah, D. Ananey-Obiri y R. Tahergorabi, "Sweet potato starch and a protein-based edible coating minimize the fat-uptake in deep-fat fried chicken", CyTA-Journal of Food, vol. 19, nº 1, pp. 440-447, 2021.
18. M. D. Guillén y E. Goicoechea, "Toxic oxygenated α, β-unsaturated aldehydes and their study in foods: A review", Critical reviews in food science and nutrition, vol. 2, nº 119-136, p. 48, 2008.
19. A. Daraei Garmakhany, H. Mirzaei, Y. Maghsudlo, M. Kashaninejad y S. Jafari, "Production of low fat french-fries with single and multi-layer hydrocolloid coatings", Journal of Food Science and Technology, vol. 51, nº 7, pp. 1334-1341, 2014.
20. S. Beikzadeh, A. Khezerlou, S. Jafari, Z. Pilevar y A. Mortazavian, "Seed mucilages as the functional ingredients for biodegradable films and edible coatings in the food industry", Advances in colloid and interface science, vol. 280, p. 102164, 2020.
21. Rossi-Marquez, G. R., Di Pierro, P., Mariniello, L., Esposito, M., Giosafatto, C. V., & Porta, R. "Fresh-cut fruit and vegetable coatings by transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin edible films", LWT, 100(75), 124-130, 2017
22. Z. Okcu, Y. Yavuz, S. Kerse, "Edible film and coating applications in fruits and vegetables. Alinteri J Agri Sci, 33(2), 221-226, 2018
23. H.P. Sharma, V. Chaudhary, M. Kumar, "Importance of edible coating on fruits and veget.ables: A review", J Pharm and Phytochem, 8(3), 4104-4110, 2019
24. Ç. Özden, L. Bayindirli, L, "Effects of combinational use of controlled atmosphere, cold storage and edible coating applications on shelf life and quality attributes of green peppers", Eur Food Res and Tech, 214, 320-326, 2002.
25. F. A. S Hassan, E. F., Ali, N. Y. Mostafa, R.J. Mazrou, "Shelf-life extension of sweet basil leaves by edible coating with thyme volatile oil encapsulated chitosan nanoparticles" Int J f Biol Macromol, 177, 517-525, 2021

ELABORACIÓN DE UN SUPLEMENTO ALIMENTICIO A BASE DE HONGO (*Pleurotus Ostreatus)* CON ADICIÓN DE C4H2FeO4 (FUMARATO FERROSO)

Paula Sandoval Caudillo, Daniela Cruz Monroy, Ameyal Álvarez Melchor, Adriana Itzel Rojas Juan, Karelia Liliana Rangel Ruiz y Jorge Alberto Granados Olvera

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli
1222202046@upci.edu.mx

RESUMEN

El hongo *Pleurotus ostreatus*, (hongo ostra), es una alternativa nutricional, económica y ecológica para complementar la dieta ya que la población lo ha aceptado para su cultivo y autoconsumo, usándolo como sustituto de carne en los hogares mexicanos.

El hierro (fumarato ferroso, gluconato ferroso, sulfato ferroso) se utiliza para tratar o prevenir la anemia (padecimiento que ocasiona un descenso en el número de glóbulos rojos) en niños, mujeres embarazadas y adultos mayores, cuando la cantidad de hierro ingerida en la dieta no es suficiente. El hierro es un mineral disponible como suplemento dietético. Su acción consiste en ayudar al cuerpo a producir glóbulos rojos, los cuales, contienen aproximadamente 33% de hierro elemental, lo que lo hace más eficiente.

El objetivo principal del presente trabajo es elaborar un suplemento alimenticio en polvo a base de *P. ostreatus* y fumarato ferroso para tratar los bajos niveles de hierro en personas con anemia, mejorando así que los niveles de oxígeno puedan estar disponibles para las células del cuerpo humano, otra de las ventajas es que esta metodología permite una dosificación flexible (se puede ajustar la cantidad según las necesidades del consumidor).

Para obtener los cuerpos fructíferos, se usó como sustrato paja y 500 g de *P. ostreatus* y tres diferentes cantidades de Fumarato ferrosos (50g, 100g y 200g) y se incubaron a 25°C en un cuarto sin entrada de luz directa, después de 3 semanas se comenzó el riego 3 veces por día con abundante agua. Los hongos se cosecharon después de 8 semanas recolectando datos como: color, forma, textura, consistencia, medidas del cuerpo fructífero (sombrero y estipe) y morfología.

Para el análisis de la morfología se hizo uso de un vernier y se comparó con un testigo el cual no fue suplementado con fumarato ferroso. Para las pruebas posteriores, los cuerpos fructíferos, de todas las unidades experimentales, fueron molidos, hasta formar un polvo fino, las muestras fueron caracterizadas mediante Espectroscopía Infrarroja (IR) para confirmar la presencia de hierro.

Cambios en la textura, color, consistencia, morfología y tamaño de los cuerpos fructíferos fueron encontrados de acuerdo con la concentración de Fumarato con la que se suplemento cada unidad experimental. Los resultados de IR confirman la presencia de hierro en las muestras.

INTRODUCCIÓN

La anemia es una enfermedad causada por la baja concentración de hemoglobina (Hb), ya que se cuenta con una disminución en los glóbulos rojos. Si se presenta anemia en el cuerpo no produce suficiente cantidad de oxígeno en la sangre lo que genera cansancio o debilidad, entre síntomas como dificultad para respirar, dolores de cabeza y mareos (Chaparro y Suchdev, 2019). Una de las causas más importantes de esta enfermedad es la deficiencia de hierro, particularmente en mujeres y niños (Newhall y cols., 2020)

La anemia por deficiencia de hierro prevalece entre la población mexicana, entre ellas niños, niñas, mujeres entre los (12 a 49 años) y mujeres embarazadas. Es una preocupación de salud en el país (Mejía-Rodríguez y cols., 2023).

El tratamiento para la anemia dependerá del tipo que se padezca y de la gravedad de este. Para algún tipo de anemia sutil o moderada puede utilizarse suplementos de hierro, algún tipo de vitaminas o sulfato ferroso, incluso implementar alimentos ricos en minerales para la producción de glóbulos rojos (Stauder y cols., 2018).

Debido a esto el objetivo principal del trabajo es elaborar un suplemento alimenticio a base del hongo *P. ostreatus*, (hongo ostra) siendo una alternativa nutricional y del hierro (fumarato ferroso, gluconato ferroso, sulfato ferroso), para ayudar a la prevención y tratamiento de la anemia, en el país.

Este suplemento puede ayudar en el tratamiento de mujeres embarazadas, ya que se considera que es importante el tipo de dieta y el estado nutricional antes, durante y después del embarazo. Con una ingesta adecuada y suficiente de suplementos de hierro se puede evitar o disminuir los casos de anemia en el país.

TEORÍA

P. ostreatus es uno de los hongos xilótrofos más explotables, con valiosas propiedades biotecnológicas, medicinales y nutricionales (Sekan y cols., 2019), este tipo de hongo ha demostrado ser adaptable ya que no requiere de alguna condición especial para su crecimiento y su producción resulta de bajo costo. Este hongo es el segundo de mayor consumo por su gran valor nutricional y algunos aportes terapéuticos. La presencia de aminoácidos esenciales, como arginina, glutamina y ácido glutámico, así como vitaminas y minerales, es característica de las especies de *Pleurotus* (Da Silva y cols., 2012).

El hierro (fumarato ferroso) es utilizado para tratar la anemia, esto cuando la cantidad de hierro ingerida en la dieta no es suficiente. Es considerado seguro para las mujeres embarazadas (Lewkowitz y Tuuli, 2023).

Estudios anteriores han explorado la posibilidad de suplementar a *P. ostreatus* con hierro, como el trabajo presentado por Almeida y cols. (2015), en el cual la bioacumulación óptima de hierro se logró a una concentración de 150 mg L^{-1}, estos autores proponen que la bioacumulación de hierro en el micelio de *P. ostreatus* representa una oportunidad para desarrollar alimentos funcionales ricos en hierro, el micelio puede ser una alternativa económica y segura para la producción de alimentos concentrados en hierro de origen no animal.

Por su parte, Umeo y cols. (2020), evaluaron la capacidad de distintos basidiomicetos comestibles y medicinales para bioacumular hierro en su biomasa micelial. En el caso de *P. ostreatus*, se demostró que puede bioacumular concentraciones de hierro de hasta 3,197 mg/kg. Finalmente, Yokota y cols. (2016) analizaron la adición de hierro al sustrato donde se cultiva *P. ostreatus*, encontrando que la eficiencia biológica disminuía de manera drástica en los hongos suplementados, la concentración máxima encontrada fue d 478.66 mg/kg de manera que, al agregar más hierro, los hongos tuvieron un menor crecimiento, un efecto similar se encontró en la actividad antioxidante, sin embargo, se observó un incremento en el contenido de proteína. Estos investigadores postulan que el micelio y no el cuerpo fructífero podría ser una mejor alternativa como fuente de hierro no animal

PARTE EXPERIMENTAL

Se usaron pastillas de fumarato ferroso de marca comercial como fuente de hierro, a partir de las cuales se obtuvieron tres tratamientos de suplementación con diferentes cantidades de fumarato ferroso: 50g, 100g y 200g y un testigo sin suplementación.

Para la obtención de los cuerpos fructíferos, se hizo uso de micelio en grano de *P. ostreatus* (FungiPlant) y se utilizó paja como sustrato, combinando una capa de paja, una de fumarato ferroso y otra de micelio (50g), cada una de las unidades experimentales se incubaron a temperatura ambiente durante 21 días, controlando la humedad (riego abundante 3 veces al día) y la luz (se evitó la luz directa).

Después de 35 días, los cuerpos fructíferos fueron cosechados, y se evaluaron los siguientes parámetros: el color, la forma, la textura, la consistencia y morfología. Las diferencias entre las unidades experimentales fueron registradas en una tabla. Una vez medidos estos parámetros, los cuerpos fructíferos fueron secados durante 1 hora a 180°C, para posteriormente, molerlos con ayuda de un mortero.

El polvo resultante de los tratamientos de 100 y 200g , así como el testigo, fue utilizado para llevar a cabo Espectroscopía Infrarroja.

RESULTADOS

Pruebas de consistencia, color y morfología

Una vez cosechados los hongos, se procedió a realizar diversas pruebas entre ellas de consistencia, color y textura, los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 1, donde se puede observar que el color entre las unidades experimentales variaba, oscureciéndose entre mayor era la concentración de fumarato con la que se suplementaba.

De igual forma, la consistencia fue cambiando entre el testigo y los tratamientos, se observó que en los hongos suplementados la consistencia era más firme y endurecida que en la presentada por el testigo que era suave y fácil de desmenuzar.

En cuanto a la textura, se percibía más dura y difícil de romper entre los tratamientos, en comparación al testigo, revelando un posible cambio en la estructura del hongo.

TRATAMIENTO	CONSISTENCIA	COLOR	MORFOLOGÍA
Testigo	-La biomasa del cuerpo fructífero, resultaba desmenuzable -Se observaron fibras cuando se fragmentaba.	Mayormente entre blanco y tonalidades de hueso.	-Sombrero: embudo -Laminas: anastomosadas -Textura: Seco, blanda y frágil al tacto -Tamaño: 5 cm
50gr	-La biomasa no resultaba desmenuzable, se sentía más endurecido -Se observaron fibras en dirección en que era fragmentada.	Oscilaba entre tonos hueso y mostaza.	-Sombrero: embudo -Laminas: anastomosadas -Textura: dura pero sensible al tacto -Tamaño: 6 cm
100gr	- La biomasa no resultaba desmenuzable, se sentía más endurecido -Se observaron fibras en dirección en que era fragmentada.	Presencia de marrón claro y tonalidades en beige.	-Sombrero: embudo -Laminas: anastomosadas -Textura: dura pero sensible al tacto -Tamaño: 5 cm
200gr	La biomasa no resultaba desmenuzable, se sentía más endurecido. -Se observaron fibras en dirección en que era fragmentada.	Entre marrón y mostaza.	-Sombrero: ondulado -Laminas: anastomosadas -Textura: Dura con dificultad de romper -Tamaño: 7 cm

Tabla 1: Descripción de la consistencia, el color y la morfología del testigo y los tratamientos

En el caso de la morfología, los cambios más relevantes incluyeron al tamaño de los cuerpos fructíferos, los cuales variaron entre 5 cm para el testigo, y de 6 a 7 cm en los tratamientos, en la tabla 2 se puede observar la diferencia de tamaños finales entre el testigo y los tratamientos, de igual

forma, se puede observar que en el tratamiento de 200g la forma del sombrero adquirió una forma más rizada en las orillas a los 56 días de cultivo, justo antes de la cosecha. Da Silva y cols. (2012), encontraron cambios semejantes en la morfología del hongo cuando fue suplementado con selenio.

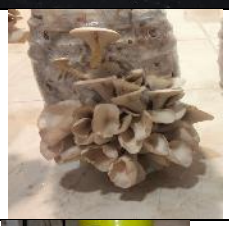
TRATAMIENTO	Inicio	28 DÍAS	56 DÍAS
Testigo			
50 gr			
100 gr			
200 gr			

Tabla 2: Morfología de *P. ostreatus,* por tratamiento, al inicio, transcurridos 28 días y transcurridos 56 días que corresponde al final de la fase de cultivo

Espectroscopia IR

En la Imagen 1 se presentan los resultados del IR, se pueden observar picos en las 3 muestras que indican la presencia de diferentes grupos funcionales. La banda entre 1700-1600 cm^{-1} (Imagen 1, inciso A) está asociada con grupos carbonilo (C=O), lo que es característico del fumarato. La región de 1300-1100 cm^{-1} (Imagen 1, inciso B) muestra absorciones de enlaces C-O, también relacionados con el fumarato y posiblemente con estructuras de carbohidratos presentes en el hongo, en estudios recientes (Effiong y cols, 2024) se calculó que *P. ostreatus* contiene aproximadamente 43.42% de carbohidratos en su composición, siendo los más abundantes glucosa, fructosa y galactosa, es probable que debido a su abundancia sean los que se muestran en el espectro .

La zona de 600-400 cm^{-1} (Imagen 1, inciso C) sugiere la posible interacción del compuesto con hierro (Fe-O), lo que puede indicar la presencia de complejos metálicos en la muestra. Finalmente, el rango 3300-3200 cm^{-1} (Imagen 1, inciso D) representa la absorción de O-H, lo cual es típico en polisacáridos, indicando que los componentes del hongo podrían estar influyendo en el perfil espectral

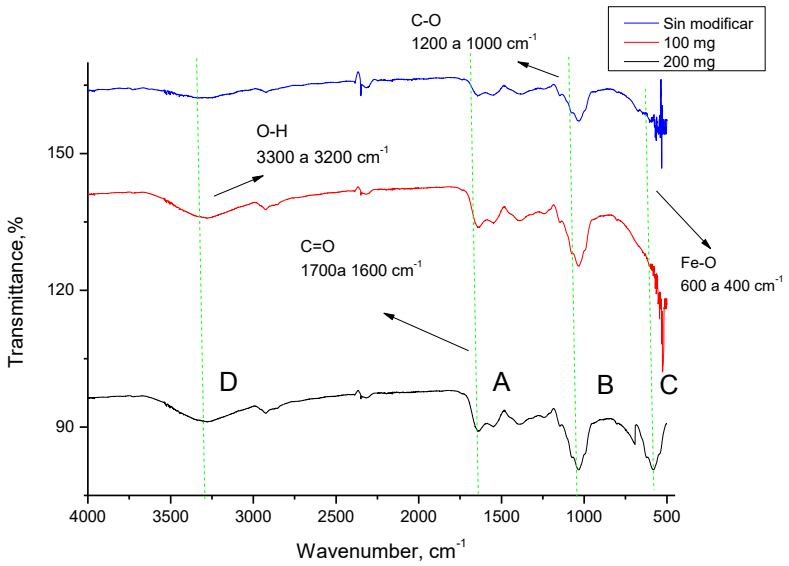


Imagen 1: Espectro IR resultante de las muestras testigo (azul), suplementado con 100mg (rojo) y suplementado con 200mg (negro). Los incisos A, B, C, D, señalan los picos característicos más relevantes para la espectroscopia IR.

CONCLUSIONES

La elaboración del suplemento alimenticio a base de *Pleurotus ostreatus* con adición de fumarato ferroso demostró ser una alternativa viable, a través del proceso de cultivo y enriquecimiento del hongo, se logró obtener un producto con características de consistencia, textura y morfología favorables para la formulación de un suplemento alimenticio, así como una concentración significativa de hierro, lo que sugiere un potencial nutricional en su aplicación.

Los análisis realizados, como la espectroscopia infrarroja, confirmaron la presencia de compuestos relevantes como la presencia del hierro, lo que refuerza la importancia de continuar investigando su estabilidad, bioacumulación y biodisponibilidad en diferentes condiciones.

Un posible punto de mejora podría ser utilizar la Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama (FAAS) para determinar las concentraciones de hierro como en el trabajo realizado por Umeo y cols. (2020), ya que esta técnica se especializa en la evaluación de metales.

Estos resultados abren la posibilidad de desarrollar nuevos productos funcionales a partir de hongos comestibles, contribuyendo a la nutrición y salud pública.

BIBLIOGRAFÍA

1. Almeida, S. M., Umeo, S. H., Marcante, R. C., Yokota, M. E., Valle, J. S., Dragunski, D. C., Colauto, N. B., & Linde, G. A. (2015). Iron bioaccumulation in mycelium of Pleurotus ostreatus. *Brazilian journal of microbiology : [publication of the Brazilian Society for Microbiology]*, *46*(1), 195–200. https://doi.org/10.1590/S1517-838246120130695
2. Chaparro, C. M., & Suchdev, P. S. (2019). Anemia epidemiology, pathophysiology, and etiology in low- and middle-income countries. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1450*(1), 15–31. https://doi.org/10.1111/nyas.14092
3. Effiong, M. E., Umeokwochi, C. P., Afolabi, I. S., & Chinedu, S. N. (2024). Assessing the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom). *Frontiers in nutrition*, *10*, 1279208. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1279208

4. da Silva, M. C.S, Naozuka J., da Luz J. M. R., de Assunção, L. S., Oliveira, P. V., Vanetti, M. C.D., Bazzolli, D. M.S. y Kasuya, M. C. M. (2012). Enrichment of Pleurotus ostreatus mushrooms with selenium in coffee husks. Food Chemistry, 131(2), 558-563. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.023
5. Lewkowitz, A. K., & Tuuli, M. G. (2023). Identifying and treating iron deficiency anemia in pregnancy. *Hematology. American Society of Hematology. Education Program*, *2023*(1), 223–228. https://doi.org/10.1182/hematology.2023000474
6. Mejía-Rodríguez, F., Mundo-Rosas, V., García-Guerra, A., Mauricio-López, E. R., Shamah-Levy, T., Villalpando, S. y De la Cruz-Góngora, V. (2023). Prevalencia de anemia en la población mexicana: análisis de la Ensanut Continua 2022. Salud Publica Mex. 2023;65 (supl 1):S225-S230. https://doi.org/10.21149/14771
7. Newhall, D. A., Oliver, R., & Lugthart, S. (2020). Anaemia: A disease or symptom. *The Netherlands journal of medicine*, *78*(3), 104–110. https://www.njmonline.nl/getpdf.php?id=2206
8. Sekan, A. S., Myronycheva, O. S., Karlsson, O., Gryganskyi, A. P., & Blume, Y. (2019). Green potential of *Pleurotus* spp. in biotechnology. *PeerJ*, *7*, e6664. https://doi.org/10.7717/peerj.6664
9. Stauder, R., Valent, P., & Theurl, I. (2018). Anemia at older age: etiologies, clinical implications, and management. *Blood*, *131*(5), 505–514. https://doi.org/10.1182/blood-2017-07-746446
10. Umeo, S. H., Faria, M. G. I., Dragunski, D. C., Valle, J. S. D., Colauto, N. B., & Linde, G. A. (2020). Iron Or Zinc Bioaccumulated In Mycelial Biomass Of Edible Basidiomycetes. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, *92 Suppl 2*, e20191350. https://doi.org/10.1590/0001-3765202020191350
11. Yokota, M. E., Frison, P. S., Marcante, R. C., Jorge, L. F., Valle, J. S., Dragunski, D. C., Colauto, N. B., & Linde, G. A. (2016). Iron translocation in Pleurotus ostreatus basidiocarps: production, bioavailability, and antioxidant activity. *Genetics and molecular research : GMR*, *15*(1), 10.4238/gmr.15017888. https://doi.org/10.4238/gmr.15017888

EFECTO DEL PROCESADO POR ULTRASONIDO PARA PRESERVAR COMPUESTOS BIOACTIVOS DURANTE EL ALMACENAMIENTO ACELERADO DEL ACEITE DE *Persea Americana Var. Hass*

Héctor Eduardo Martínez Flores[1], Kenneth Caín Aguilar Arciga[1], Alfonso Topete Betancourt[1], Ma. Guadalupe Garnica Romo[2]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
[2]Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Hector.martinez.flores@umich.mx

RESUMEN

De las diferentes variedades de aguacate el *Persea americana* var. Hass es el más apreciado. De los productos del aguacate, el aceite está obteniendo gran aceptación en los mercados nacionales e internacionales. El aceite de aguacate (AA) contiene compuestos bioactivos capaces de prevenir enfermedades. Por lo que el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del tratamiento por ultrasonidos del AA de la variedad Hass sobre algunos de sus componentes bioactivos durante el almacenamiento. El AA fue extraído por centrifugación, y enseguida se le aplicó un tratamiento con equipo de ultrasonidos, a una amplitud de 20% por 4 min. Posteriormente, el AA fue colocado en cámara bajo condiciones de almacenamiento acelerado a 50 °C y 40% de humedad. Las mediciones de peróxido, y constantes K470 y K670, que corresponden a carotenoides y clorofila, respectivamente, para medir el grado de degradación o estabilidad del AA se efectuaron cada tercer día por un período de 31 días, lo cual equivalió a 248 días en condiciones ambientales a 25 °C. Se comparo contra una muestra control de AA sin que se le aplicará ningún tratamiento. Al final del experimento, el AA control presento un valor peróxido de más del doble de valor, 9.99 mEQ/1000 g, frente a un valor de 4.0 mEQ/1000 g en el AA tratado con ultrasonido. La muestra control presento un mayor índice de acidez, 0.95 frente a 0.8 del AA tratado por ultrasonidos. Los valores de clorofila presentaron la misma cantidad tanto en el AA control como en el tratado por ultrasonidos, siendo de 5.035 mg/kg. Para el caso de los carotenoides totales el AA tratado por ultrasonidos tuvo un valor más elevado 6.20 ppm contra un valor en el AA control de 5.74 ppm. El tratamiento ultrasónico mantuvo la estabilidad oxidativa, ya que logró preservarlo hasta el día 31 del experimento equivalente a 248 días sin la adición de antioxidantes comparado contra el control, pudiendo ser una alternativa para aumentar la vida de anaquel del aceite de aguacate.

INTRODUCCIÓN

El árbol de aguacate es un cultivo que se ha extendido mundialmente y México es el país tanto con mayor producción como de mayor volumen de comercialización de su fruto, representando alrededor de un tercio del total mundial. Los frutos de aguacate mexicanos presentan características sensoriales muy atractivas comparadas contra variedades que se ofertan en el extranjero; además, las variedades mexicanas poseen una mayor cantidad de aceite por fruto, siendo de aproximadamente de un 20%, y son altamente resistentes a climas fríos (1,2).

El fruto de aguacate (*Persea americana*) consiste en una única semilla grande rodeada por una pulpa comestible cremosa, de textura suave, y está envuelta de una epidermis gruesa de superficie. El fruto es colectado del árbol cuando está desarrollado, sin estar maduro del todo, una vez cortado, el proceso de maduración del aguacate continua hasta alcanzar su madurez óptima de consumo. El aguacate tiene la peculiaridad de almacenar aceite en las etapas de crecimiento y desarrollo y una vez cortado del árbol su acumulación se detiene. El principal componente del aceite de aguacate está como triglicéridos, siendo el ácido oleico su principal constituyente. En términos generales, el mesocarpio contiene aproximadamente entre un 60% y 70% de aceite (base seca) y un 10% de carbohidratos (base seca) (3).

La producción y consumo de aguacate ha aumentado significativamente en las últimas dos décadas ya que existe continuamente una mayor demanda tanto del fruto como de sus derivados. Por un lado, por su sabor, textura agradable al tacto, y a su contenido nutrimental, y contenido de compuestos químicos que generan bienestar a la salud humana, aunado al interés por la industria sobre parámetros de calidad y pureza para comercializarlos; no obstante, actualmente no existe una limitación clara en los parámetros antes mencionados para verificar la autenticidad y calidad anunciada de los productos derivados del aguacate, particularmente en el aceite de aguacate (4-5). Con la finalidad de tener protocolos y establecer parámetros de calidad en el aceite de aguacate es menester saber la composición exhaustiva del aceite, tomando en consideración que, puede haber variaciones en función de la región donde se siembra, la temporada del año en la que se cultiva, el grado de madurez cuando se colecta, y de las condiciones de crecimiento, parámetros de comercialización (tiempos y condiciones de almacenamiento del aguacate antes de someterlo a los procesos de extracción del aceite). A pesar de conocer algunos de los factores que afectan la calidad del aceite se requieren más estudios que generen conocimiento para establecer procesos que conserven la calidad del aceite, que se tengan óptimos rendimientos de extracción y que sean reproducibles que garanticen su inocuidad y sean de la mejor calidad posible (6-9).

El contenido graso del aguacate presenta un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, de un 65 a un 70%, un 10 a 15% de ácidos grasos poliinsaturados y de un 10 a un 20% de ácidos grasos saturados; el aceite de aguacate también presenta compuestos activos como son carotenoides, tocoferoles, esteroles y clorofila, que se han relacionado en el tratamiento contra enfermedades diversas como el cáncer y las cardiovasculares.

La demanda de aceite de aguacate ha crecido para ser aplicado en usos culinarios y en general en la industria particularmente por las propiedades saludables; el aceite de aguacate puede emplearse tanto crudo en la formulación de aderezos o bien a altas temperaturas para la cocción y fritura de productos alimenticios; otro uso que ha generado interés es en la aplicación de productos cosmecéuticos, como por ejemplo en el cuidado de la piel y cabello por sus atributos de hidratación hidratantes (10) y protección contra la radiación solar.

Diversos métodos se han propuesto para obtener la mayor cantidad de aceite con una adecuada calidad, en donde es importante considerar, el rendimiento, calidad y pureza del aceite extraído, su contenido en ácidos grasos y de compuestos bioactivos, la estabilidad oxidativa, entre otros aspectos; todas las condiciones de proceso influyen en la calidad del aceite (11,12). Para hacer los procesos más rápidos o eficientes es posible combinar dos o más metodologías de extracción; de forma general, los métodos de extracción industrial más utilizados son los siguientes, prensado en frío, uso de solventes (hexano, éter de petróleo, o mezcla de solventes.

Existen otras metodologías, entre las que destacan que pueden usarse solas o en combinación, microondas, procesamiento de alta presión, la luz pulsada, el ultrasonido, el plasma ultravioleta, termo sonicación, entre otras tecnologías (10,13-14). Por ejemplo, el ultrasonido utiliza ondas sonoras cuya frecuencia supera el límite del oído humano (~20 kHz); induciendo cambios fisicoquímicos en las diversas matrices alimentarias a través de cavitaciones acústicas e hidrodinámicas.

Proceso de ultrasonido

De manera general la cavitación conduce ciclos alternados de expansión y compresión en un medio líquido, generalmente acuoso aunque pueden utilizarse otros solventes; en la etapa expansiva, las ondas generadas durante la aplicación del ultrasonido facilitan la creación de diminutas burbujas que se fusionan en función del tiempo, incrementando su tamaño, hasta que, en la etapa de compresión las burbujas alcanzan un volumen y tamaño límite, en donde, inmediatamente se colapsan de manera intensa (implosión), y liberan la energía en forma de calor. Las burbujas de cavitación y la energía liberada durante la implosión alteran la estructura celular y los componentes de la membrana celular, induciendo a la lisis celular, provocando daños a la pared celular, la inducción de pequeños poros en la membrana de la pared celular y/o un efecto de esterilización localizado. El fenómeno es

aplicable a la extracción de aceite de aguacate, ya que esta lisis vegetal libera el aceite contenido y posteriormente, por metodologías sencillas como son el prensado o centrifugación se puede separar la fracción líquida de la sólida. También es aplicable como metodología de conservación del aceite extraído si se aplica de manera controlada (15-17).

Al tratar una muestra de aceite con ultrasonido los efectos estarán en función de la intensidad, frecuencia y duración del tratamiento; llevando condiciones controladas del ultrasonido se puede obtener un buen rendimiento y una calidad óptima del aceite de aguacate; sin embargo, si las condiciones son muy intensas, se puede inducir la alteración de la estructura de los lípidos, formando radicales libres y en consecuencia la oxidación del aceite, disminuyendo drásticamente su vida de almacén. Por otro lado, la exposición prolongada al ultrasonido puede cambiar la viscosidad del aceite debido a la ruptura de las cadenas moleculares, esto se da en menor medida debido a que el producto se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente, sin embargo, el cambio de viscosidad es perceptible. Otro de los procesos posibles en el sistema es la emulsificación del aceite, si el proceso de extracción de aceite no es muy efectivo, pueden quedar pequeñas cantidades de agua u otra fase líquida en el sistema, el ultrasonido puede dispersar finamente el aceite, formando una emulsión estable; este proceso es útil en aplicaciones industriales y cosméticas, pero a la hora de comercializar el aceite puro es indeseable. Un efecto deseable podría ser la inactivación enzimática, la inactivación directa se podría dar por colapso de las burbujas pueden impactar a las enzimas, desnaturalizándolas al romper enlaces covalentes y no covalentes en su estructura, alterando su actividad; mientras que la inactivación indirecta se podría dar por el aumento de temperatura del sistema o la formación de radicales libres, alterando la catálisis de la misma al no estar en un medio óptimo de acción, y desnaturalización por oxidación o desactivación respectivamente (18-19). De acuerdo con lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del tratamiento por ultrasonidos del aceite de aguacate de la variedad Hass sobre algunos de sus componentes bioactivos durante el almacenamiento acelerado.

PARTE EXPERIMENTAL

Materia prima

El aceite se obtuvo de la pulpa del fruto de aguacate maduro por medio de prensado en frío y centrifugación. Para ello, a la pulpa triturada se le aplicó un proceso inicial de extracción para separar el aceite de la matriz celular por medio de prensado, y posteriormente fue sometido a centrifugación para separar los componentes más densos del aceite (que es menos denso) en diversas capas; de esta manera el aceite se acumula en la parte superior pudiéndose separa fácilmente de las otras capas.

Tratamiento con ultrasonido y almacenamiento

Al inicio de cada corrida experimental se tomó una muestra de 250 mL, para posteriormente incidirla con ondas mecánicas longitudinales con el uso del equipo de ultrasonido a una amplitud de 20% por 4 min. El equipo utilizado el Vibra Cell Ultrasound, modelo VC505 (Sonics & Materials, INC, Newtown, USA). La muestra de aceite sometida a ultrasonido, se separó en viales y se colocó en una cámara de almacenamiento bajo condiciones aceleradas a 50 °C y 40% de humedad. La cámara utilizada fue la ECOSHEL®, modelo C800D, intensidad de luz 0-5500LUX fabricado en Estados Unidos de América. Adicionalmente, se realizó la prueba con el aceite de aguacate sin tratamiento por ultrasonido. Las variables de respuesta del aceite sometido a condiciones de almacenamiento fueron valor de peróxido, y constantes K470 y K670, que corresponden a carotenoides y clorofila, respectivamente, para medir el grado de degradación o estabilidad del aceite de aguacate, realizándose cada tercer día por un período de 31 días que equivalió a 248 días. Para ello, se utilizaron ecuaciones que implican la variación de la velocidad de reacción cada 10°C:Q10, debido a que el factor Q10 se utiliza para la determinación de la utilidad alimentaria, este se define como el número de veces que el deterioro del alimento se acelera o disminuye dependiendo de si la temperatura aumenta o disminuye 10 grados centígrados (20). Cabe mencionar que la prueba de almacenamiento consiste en simular condiciones de almacenamiento extremas, en este caso a 50 °C para disminuir los tiempos de almacenamiento, comparado con la realización de la prueba a temperatura de 20 °C. Por ejemplo, a 30 °C el valor de Q10 = 1 es decir 1^1 donde 1 día a temperatura

ambiente equivale a 1 día, a 50 °C el valor de Q10 es = 3 es decir, 2^3 que equivale 1 día a temperatura de 30 °C equivale a 8 días y 1 día a 50 °C equivale a 248 días.

Medición de pigmentos

Una vez transcurrido el intervalo de tiempo estipulado se retiró el vial de la cámara de envejecimiento acelerado para posteriormente atemperar la muestra en una cámara oscura por 15 min. Se pesaron 3.75 g ±0.005 g de la muestra de aceite en una balanza analítica dentro de un matraz volumétrico de 25 mL. Y se disolvió la muestra en ciclohexano hasta la línea de aforo del matraz volumétrico. Al finalizar la preparación de la muestra a medir se calibró el espectrofotómetro con ciclohexano a una longitud de onda de 670 nm para clorofilas y una longitud de 470 nm para carotenoides (calibrando con el solvente en cada cambio de absorbancia para minimizar al mínimo errores de medición) por triplicado, reportando el promedio de absorbancia por muestra. El quipo utilizado fue un espectrofotómetro UV/Vis, modelo VE-5600UV (Cientifica Vela Quin S.A de C.V.).

Para valorizar el contenido total del pigmento a medir se tomaba en cuenta el coeficiente de extinción; el cual a su vez se relaciona directamente con la ley de Beer-Lambert; la cual toma en cuenta la capacidad de una solución de absorber un haz de luz a una distancia determinada por la longitud de la celda; cuantificando la concentración de tales compuestos de interés en la solución.

De este modo, a través de las siguientes fórmulas se obtiene la cantidad de pigmento total en la muestra, ecuación 1 clorofila total, ecuación 2 carotenos totales:

$$\boldsymbol{Clorofila\ total}: \frac{Absorbancia_{670}\ x\ 10^6}{613\ x\ 100\ x\ longitud\ de\ la\ celda} \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$\boldsymbol{Carotenos\ totales}: \frac{Absorbancia_{470}\ x\ 10^6}{2000\ x\ 100\ x\ longitud\ de\ la\ celda} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Medición de valor peróxido

Para medir el valor peróxido se procedió a pesar 5 g del aceite a medir, y se adicionaron 30 mL de la mezcla CH_3COOH-$CHCl_3$ 3:2 para disolver la muestra; posteriormente, se agregó 1 mL de KI saturado y se agitó la mezcla por 1 min en una cámara oscura, para evitar la oxidación del KI, una vez transcurrido el tiempo se procedió a agregar 30 mL de agua destilada a temperatura ambiente para finalmente adicionar 0.5 mL de la solución de almidón al 1%, agitando ligeramente el medio para asegurar una reacción completa; dependiendo del grado de peroxidación del aceite la mezcla adquiere una coloración oscura. Una vez preparada la mixtura de reacción se tituló con tiosulfato de sodio 0.1N hasta la desaparición de la tonalidad oscura en el medio; para, finalmente con la fórmula siguiente se denota el valor peróxido del aceite medido. En la ecuación 3 se indica la fórmula empleada para obtener el valor de peróxido:

$$\boldsymbol{Valor\ per\acute{o}xido}: \frac{Volumen\ de\ titulaci\acute{o}n * N\ tiosulfato\ de\ Na * 1000}{Peso\ de\ la\ muestra.}$$

Ecuación 3

Medición de índice de acidez

Una vez atemperada la muestra en una cámara oscura por aproximadamente 15 min y se pesaron 5 g de la muestra a analizar para posteriormente adicionar 50 mL de la mezcla $CH3CH_2OH$-$CH_3CH_2OCH_2CH_3$ 3:2, agregando 5 gotas del indicador fenolftaleína y posterior a una ligera agitación para homogeneizar el medio se procedió a titular la mezcla de reacción con NaOH 0.1 N hasta la desaparición de la tonalidad rosa-naranja; para, finalmente con la siguiente fórmula obtener el índice de acidez del aceite medido. En la ecuación 4 se muestra la fórmula para obtener el índice de acidez:

$$\boldsymbol{\acute{I}ndice\ de\ acidez}: \frac{Volumen\ de\ titulaci\acute{o}n * N\ NaOH * 1000}{Peso\ de\ la\ muestra.}$$

Ecuación 4

RESULTADOS

La muestra de aceite de aguacate sin el tratamiento ultrasónico durante 4 min presento un valor peróxido de más del doble de valor (9.99 de valor de peróxido del aceite de aguacate crudo sin tratar, frente a un valor de 4.0 de peróxidos en el aceite tratado con ultrasonido); de igual manera la muestra sin tratar presento un mayor índice de acidez (0.95 del aceite sin tratamiento frente a 0.8 del aceite tratado), denotando la pérdida de los atributos fisicoquímicos y nutricionales. Asimismo, a pesar de presentar un valor igual en clorofila total (5.035 mg/kg de aceite), el valor de carotenos totales es diferente, presentando una mayor cantidad de estos pigmentos en el aceite tratado (encontrando 5.035 mg/kg de aceite en el caso del aceite sin tratar y 8.595 mg/kg en el aceite tratado). La muestra sin tratar presento una actividad de agua de 0.586; mayor que la muestra tratada con ultrasonido, la cual tuvo una actividad de agua de 0.445. De acuerdo al tipo de tratamiento (humedad de 40% y 50 ^{o}C) y mediante la ecuación de Arrhenius se estableció que el tiempo en cámara de las muestras al final del experimento era equivalente a 248 días a temperatura ambiente. Logrando mantener los atributos fisicoquímicos por ese periodo de tiempo (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de los atributos fisicoquímicos y de clorofila y carotenoides en las muestras de aguacate procesadas por ultrasonido y el control sin tratamiento ultrasónico durante almacenamiento acelerado.

Parámetros	**Aceites**	
Aspecto:	*Control*	*Tiempo de 4 minutos*
Volumen (mL)	20 mL	20 mL
Valor peróxido	9.997	4.000
Índice acidez	0.9599	0.8000
K 670	5.035	5.035
K470	5.740	8.595

El tratamiento ultrasónico preservó el perfil lipídico de la muestra a través de la protección de los ácidos grasos a la oxidación, esto fue comprobable mediante la medición del valor peróxido en la muestra tratada frente a la muestra control. Esta medición toma en cuenta la cantidad de peróxidos e hidroperóxidos presentes; siendo indicadores de la estabilidad del aceite debido a que los aceites con valores de peróxido más altos tendrán una vida útil más corta, ya que el proceso de oxidación tiende a acelerarse a medida que el valor peróxido aumenta. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO) establecieron, de forma general un valor peróxido máximo de hasta 10 miliequivalente de oxígeno activo/kg de aceite para aceites refinados y de hasta 15 miliequivalentes de oxígeno activo/kg de aceite para aceites prensados en frío y vírgenes. Por lo que se decidió terminar el experimento cuando el aceite control llegó al valor peróxido de 9.99 meqO_2/kg; asimismo, el aceite tratado con ultrasonido mantenía un valor peróxido de 4.0 meqO_2/kg. Lo que también es comparable con estudios como los reportados por otros autores (12,21), en donde se estudian el nivel de oxidación y la estabilidad oxidativa de distintos aceites.

En otro estudio (22), indicaron que en 30 muestras de producto comercial terminado de aceite prensado en frio de linaza, la calidad inicial y el contenido de compuestos bioactivos en los aceites tienen diferentes efectos en el período de inducción y la formación de productos de oxidación durante el almacenamiento a temperatura ambiente con exposición a la luz, comprobable a través del análisis de la composición de ácidos grasos y los índices de calidad los cuales impactan aumentando los productos de oxidación primaria y secundaria a temperatura ambiente. Además, determinaron que cambios en los índices de calidad durante el almacenamiento en condiciones domésticas o de almacenamiento típicas, no es consistente. Sin embargo, al tratar muestras de aceite de aguacate con ultrasonido se logró una consistencia en los resultados, ya que las muestras se comportaban de forma similar en las corridas experimentales y denotaban el frenado de los procesos de oxidación y

aumento del índice de acidez, parámetros de calidad cruciales a la hora de determinar la viabilidad de un producto oleoso. Los investigadores (22) afirman que el contenido de ácidos grasos insaturados (principalmente ácidos C18:1 y C18:3) y compuestos fenólicos son cruciales en la estabilidad oxidativa de los aceites de linaza prensados en frío durante un mes de almacenamiento con exposición a la luz, afirmando que el alto contenido de ácido C18:1 determina la buena resistencia del aceite al proceso de oxidación; cosa que en la presente investigación no se hizo, ya que el perfil de ácidos grasos no se consideró como parámetro para evaluar la vida de anaquel de aceite de aguacate, sin embargo, podría ser considerado para una futura optimización del procedimiento. Ambos autores analizaron las muestras de aceite de linaza inmediatamente después de abrir el envase y después de almacenarlos en un lugar iluminado con fuentes de luz natural (luz diurna) y artificial (iluminación LED) durante 15 h al día, simulación de almacenamiento en condiciones de almacenamiento a temperatura ambiente (21 ± 2 °C) durante un mes obteniendo variaciones entre la muestra inicial y final de valor peróxido e índice de acidez. Mientras que en el análisis de las muestras de aguacate la iluminación fue constante, a temperaturas más elevadas y con aceite crudo; teniendo resultados mejores, ya que el aumento de valor peróxido e índice de acidez no fue tan grande como los resultados reportados (22); lo que prueba que el ultrasonido tiene un efecto beneficioso al ralentizar el aumento de los parámetros de calidad antes mencionados; Ambos autores prevén una estabilidad de 5 semanas a 3 meses (si se refrigera), mermando si se tiene un alto nivel de intensidad de iluminación, ya sea por acción de las vitrinas de las tiendas y los almacenes y/o la exposición del aceite a la luz solar. La luz es puede considerarse incluso más importante que el oxígeno durante la oxidación, porque contribuye a la fotooxidación de otros componentes del aceite (por ejemplo, las clorofilas) y luego convierte el oxígeno en forma libre. Este fenómeno conduce a una pérdida de nutrientes valiosos, cambios en el color del aceite, así como a la formación de compuestos con un sabor y aroma desagradables.

En las muestras incididas con ultrasonido obtuvo un valor de valor peróxido inicial de aproximadamente 3.9 meq de peróxido/kg de aceite y, al final del experimento un valor de peróxido de 9.9 meq de peróxido/kg de aceite, lo que representa un aumento de aproximadamente 2.5 veces del valor de valor peróxido al final del estudio en la muestra sin tratamiento y un valor de peróxido de 4.0 meq de peróxido/kg de aceite, lo que representa un aumento prácticamente insignificante; demostrando que el ultrasonido puede ser una buena opción para mantener un valor peróxido bajo en las muestras de aceite de aguacate. La información obtenida también es comparable con los resultados obtenidos en otro estudio (23), los cuáles estudiaron la estabilidad oxidativa de muestras de aceite de aguacate prensado en frío sin refinar observando una variación del valor peróxido en 2.09 veces.

En una investigación (24) implementaron el uso de ultrasonido para la extracción de aceite de aguacate en pasta de pulpa, obteniendo como resultados que la intensidad del ultrasonido no impacta de manera directa en los rendimientos de extracción de aceite, sin embargo, observaron que la intensidad y tiempo de incidencia ultrasónica si impactaba de manera directa en el valor peróxido del aceite y con ello en la calidad del mismo; lo cual es comparable con las corridas experimentales del proyecto, en las cuales se utilizaron tiempos prolongados de incidencia ultrasónica, donde las muestras que presentaban un mayor tiempo de tratamiento aumentaban la temperatura de forma significativa y aumentaban valor peróxido desde las primeras mediciones, denotando la relación del tiempo de ultrasonido y la calidad del aceite.

El tiempo de tratamiento es matemáticamente significativo, al tomar en cuenta el tiempo equivalente en días a temperatura ambiente se denota la diferencia del valor peróxido entre la muestra tratada y la muestra sin tratar, resaltando el posible efecto del ultrasonido a mantener a los peróxidos e hidroxiperóxidos a un nivel bajo. Sin embargo, también es posible notar un periodo de estabilidad en el valor peróxido de las muestras de aceite; esto puede ser por la posible formación de compuestos como son aldehídos, cetonas y alcoholes los cuales derivan de los peróxidos e hidroperóxidos; siendo este periodo de estabilidad un periodo en donde la formación de peróxidos es proporcional a la formación de compuestos volátiles. Para lo cual será necesario evaluar factores como *p*-anisidina

en las muestras para verificar la causa de la estabilidad; siendo considerable en futuras optimizaciones del proceso.

El tiempo transcurrido y el tratamiento son significativos para el aumento o disminución del índice de acidez de las muestras. Los valores de acidez dadas por las muestras se consideran normales debido a la propia naturaleza de la materia prima, ya que, los aceites crudos contienen un gran porcentaje de humedad, que, aunado al contacto con oxígeno, favorece la hidrólisis de los ácidos grasos y con ello aumente la acidez. Es por ello, que para la optimización de proceso se recomienda tomar en cuenta la humedad relativa de la muestra; no es recomendable refinar el aceite de aguacate, ya que, si bien es posible eliminar la humedad del producto por la naturaleza del propio proceso es posible eliminar compuestos de interés y con ello mermar la calidad del producto.

En términos de los principales pigmentos del aceite de aguacate estudiado el valor de clorofila total, de acuerdo con los datos experimentales parece no sufrir un efecto diferente si se aplica el tratamiento o no, o en su defecto, es un efecto mínimo. Lo que no es completamente negativo, ya que se entiende que el ultrasonido no degrada el pigmento y lo mantiene en la matriz alimentaria. Por lo que, su sinergia con algún otro proceso podría ser evaluada para mantener la concentración alta de la clorofila por un tiempo mayor. Ya que, se observa que el tiempo transcurrido si degrada a la clorofila, por lo que se debe investigar alguna metodología combinable con el ultrasonido para extender la vida media de los pigmentos por tiempos prolongados. Por su parte, el tiempo transcurrido del experimento parece ser significativo para la concentración de carotenos en las muestras, especialmente a la hora de preservar este tipo de compuestos de las distintas corridas experimentales. Un estudio más profundo es necesario para determinar las causas y comportamiento de este tipo de compuestos en las muestras de aceite de aguacate.

El tiempo de tratamiento no parece ser significativo al inicio del experimento, sin embargo, al transcurrir el tiempo se observa una clara diferencia en el comportamiento de las muestras. Ya que, mientras que la muestra sin tratamiento presenta una actividad de agua mayor, la muestra tratada parece disminuirla mientras más pasa el tiempo. Este factor podría estar relacionado directamente con el valor peróxido; ya que la baja actividad de agua evita que la oxidación del aceite se incremente, sabiendo que dentro de las reacciones de oxidación libere agua al medio y esa agua liberad se utilice para seguir hidrolizando lípidos, además de otras reacciones indeseables en la muestra, pudiendo ser la actividad de agua un efecto colateral del valor peróxido.

CONCLUSIONES

A través del análisis de parámetros de calidad aplicables al aceite como fueron: valor peróxido, índice de acidez, como factores de respuesta directa asociados a la vida de anaquel del aceite de aguacate, así como la evaluación de factores indirectos asociados la vida de anaquel como lo con la cantidad de pigmentos disueltos en el aceite (clorofila y carotenoides) fue posible evaluar la vida de anaquel de muestras de aceite crudo de aguacate sin tratar; con un tratamiento a una amplitud de onda de 20% durante 4 min a través de una cámara de envejecimiento controlado con condiciones controladas (40% de humedad, a 40 ºC y un impacto constante de luz), pudiendo comparar ambas corridas experimentales a través de la evaluación de parámetros de calidad de tales muestras antes descritas. El uso de ultrasonido para mejorar la vida de anaquel del aceite de aguacate resultó ser eficiente para preservar los compuestos bioactivos del aceite y mantener sus propiedades fisicoquímicas, manteniéndola por 248 días.

BIBLIOGRAFÍA

1. P. Jimenez, P. Garcia, V. Quitral, K. Vasquez, C. Parra-Ruiz, M. Reyes-Farias, D. F. Garcia-Diaz, P. Robert, C. Encina, C., J. Soto-Covasich, J, “Pulp, Leaf, Peel and Seed of Avocado Fruit: A Review of Bioactive Compounds and Healthy Benefits”, Food Rev. Int., Vol. 37(6), 2021, pp. 619–655.

2. C. Méndez Hernández, D. M. Ríos, B. Rodríguez-Galdón, E. M. Rodríguez-Rodríguez, “Study of environmental factors on the fat profile of Hass avocados”, J. Food Compos. Anal., Vol. 123, 2023,105544.
3. R. Pedreschi, C. Fuentealba, V. Uarrota, J. E. Alvaro, P. Olmedo, B. G. Defilippi, C. Meneses C, R. Campos-Vargas, “Primary Metabolism in Avocado Fruit”, Front Plant Si., Vol. 10, 2019, pp. 795.
4. H. S. Green, S. C. Wang, “First report on quality and purity evaluations of avocado oil sold in the US”, Food Control, 116, 220, 107328.
5. H. S. Green, S. C. Wang, “Evaluation of proposed CODEX purity standards for avocado oil”, Food Control, Vol. 143, 2023, 109277.
6. A. Björn, P. S. de L. Monja, A. Karlsson, J. Ejlertsson, B. H. Svensson, A. Björn, P.S. de L. Monja, A. Karlsson, J. Ejlertsson, B. H. Svensson, “Rheological Characterization. In Biogas”, IntechOpen. 2012.
7. R. Ferreyra, G. Sellés, J. Saavedra, J. Ortiz, C. Zúñiga, C. Troncoso, S. A. Rivera, M. González-Agüero, B. G. Defilippi, “Identification of pre-harvest factors that affect fatty acid profiles of avocado fruit (Persea americana Mill) cv. ‘Hass’ at harvest”, S. African J. Bot., 104, 2016, pp. 15–20.
8. G. D. Fernandes, R.B. Gómez-Coca, M. C. Pérez-Camino, W. Moreda, D. Barrera-Arellano, D, “Chemical characterization of commercial and single-variety avocado oils”. Grasas y Aceites, Vol. 69(2), 2018, Article 2.
9. Y. N. Manaf, A. P. Rahardjo, Y. A Yusof, M. N. Desa, B. P. Nusantoro, B. P. “Lipid characteristics and tocopherol content of the oils of native avocado cultivars grown in Indonesia” Int. J. Food Prop., 21(1), 2018, pp. 2758–2771.
10. F. D. Krumreich, C. D. Borges, C. R. B. Mendonça, C. Jansen-Alves, R. C. Zambiazi, “Bioactive compounds and quality parameters of avocado oil obtained by different processes”, Food Chem., Vol. 257, 2018, pp. 376–381.
11. S. P. C. J. K. Henry, “Oxidative stability and shelf-life evaluation of selected culinary oils”, Int. J. Food Sci. Nutr., 60 Suppl. 7, 209, pp. 289–296.
12. M. Maszewska, A. Florowska, E. Dłużewska, M. Wroniak, K. Marciniak-Lukasiak, A. Żbikowska, “Oxidative Stability of Selected Edible Oils” Molecules : A J. Synthetic Chem. Nat. Product Chem., Vol. 23(7), 2018, pp. 1746.
13. O. B. O. Ashton, M. Wong, T. K. McGhie, R. Vather, Y. Wang, C. Requejo-Jackman, P. Ramankutty, A. B. Woolf, “Pigments in avocado tissue and oil”, J. Agric. Food Chem., Vol. 54(26), 2006, 10151–10158.
14. I. Santana, V. N. Castelo-Branco, B. M. Guimarães, L. de O. Silva, V. O. D. S. Peixoto, L. M. C. Cabral, S. P. Freitas, A. G. Torres, A. G. “Hass avocado (Persea americana Mill.) oil enriched in phenolic compounds and tocopherols by expeller-pressing the unpeeled microwave dried fruit”, Food Chem., Vol. 286, 2019, pp. 354–361.
15. J. Senrayan, S. Venkatachalam, S. “Ultrasonic acoustic-cavitation as a novel and emerging energy efficient technique for oil extraction from kapok seeds”, Innov. Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 62, 2020, 102347.
16. H. Yang, D. Wang, J. Jiang, Y. Yang, H. Yu, “Effect of jet cavitation on oil recovery from oily sludge”, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, Vol. 199, 2024,
17. B. Wang, T. Zeng, J. Shang, J. Tao, Y. Liu, T. Yang, H. Ren, G. Hu, “Bubble dynamics model and its revelation of ultrasonic cavitation behavior in advanced oxidation processes: A review”, J. Water Process Eng., Vol. 63, 2024, 105470.
18. M. L. Rojas, T. S. Leite, M. Cristianini, I. Dutra Alvim, P. E. D. Augusto, “Peach juice processed by the ultrasound technology: Changes in its microstructure improve its physical properties and stability” Food Res. Int., Vol. 82, 2016, pp. 22–33.
19. K. Chen, Y. Li, C. Zhou, Y. Wang, Z. Zalán, T. Cai, “Inhibitory effects of chlorophyll pigments on the bioaccessibility of β-carotene: Influence of chlorophyll structure and oil matrix” Food Chem., Vol. 451, 2024, 139457.

20. R. E. Tranquilino “Estudio de las propiedades antioxidantes de un extracto polifenólico de *Opuntia* spp. nanoencapsulado e incorporado en tortilla de maíz. 2021. Tesis. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.
21. X. Li, Y. Li, F. Yang, R. Liu, C. Zhao, Q. Jin, X. Wang, “Oxidation degree of soybean oil at induction time point under Rancimat test condition: Theoretical derivation and experimental observation” Food Res. Int., Vol. 120, 2019, pp. 756–762.
22. N. Mikołajczak, M. Tańska, “Effect of initial quality and bioactive compounds content in cold-pressed flaxseed oils on oxidative stability and oxidation products formation during one-month storage with light exposure” NFS J, Vol. 26, 2022, pp. 10–21.
23. M. da Silva Mour, C. A. Moreira da Silva, M. Boeira Braga, “Flaxseed and avocado oil blends: Physical and physicochemical characterization, nutritional quality and oxidative stability” App. Food Res., Vol. 3(2), 2023, 100370.
24. L. P. Martínez-Padilla, L. Franke, X. Q. Xu, P. Juliano, “Improved extraction of avocado oil by application of sono-physical processes” Ultrason. Sonochem., Vol. 40, 2018, pp. 720–726.

OBTENCIÓN DE SIDERÓFOROS DE LOS AISLADOS DE *Azotobacter Sp*. EN DIFERENTES CONCENTRACIONES DE HIERRO

Sánchez Rosas Jorge Luis[1], Venegas Meneses Berenice[1], López Pliego Liliana[2], Molina Romero Dalia[1]

Facultad de Ciencias Biológicas – BUAP[1,2], CICM-ICUAP-BUAP[3] Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
jorge.sanchezros@alumno.buap.mx, berenice.venegas@correo.buap.mx, liliana.lopez@correo.buap.mx, dalia.molina@correo.buap.mx

RESUMEN

El hierro es un nutriente indispensable para las células eucariotas y procariotas debido a su participación como un cofactor en reacciones de oxidorreducción en procesos celulares fundamentales, como son la replicación, reparación del ADN, respiración celular, fotosíntesis, transporte de oxígeno y fijación biológica de nitrógeno. La deficiencia de hierro representa el trastorno nutricional más común en humanos y plantas, que afecta la salud humana y la calidad nutricional de los cultivos. Es debido a la baja biodisponibilidad del hierro que diversos organismos han desarrollado mecanismos especializados para adquirir hierro y gestionar su homeostasis para mantener los procesos dependientes de hierro. Los sideróforos son producidos por los microorganismos en respuesta a la deficiencia de hierro, tienen alta afinidad por los iones ferrosos y los convierten en iones biodisponibles, estos metabolitos se clasifican en base a los grupos químicos que interaccionan con el hierro: catecolato, carboxilatos e hidroximato, además de los sideróforos compuestos; que son potenciales quelantes de hierro para destinar este elemento a la nutrición de la célula. Por otra parte, *Azotobacter vinelandii* es una bacteria con potencial para considerarla como una rizobacteria promotora del crecimiento vegetal (PGPR), esta bacteria produce dos clases de sideróforos, catecoles y pioverdinas, por lo que en este proyecto se estudió la capacidad de producir estos metabolitos en las cepas AEIV (cepa tipo) y los aislados *A. vinelandii* S4Ta y *Azotobacter chroococcum* SM3.2, estas dos cepas fueron aisladas de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán. Debido a que la deficiencia del hierro es un factor limitante en el rendimiento e implicaciones del manejo de los cultivos, la producción de sideróforos microbianos se plantea como una estrategia para mejorar el rendimiento de los cultivos.

Para las determinaciones de catecoles y pioverdinas se creció a la bacteria en ausencia de hierro, en medio Burk-Sacarosa con una incubación de 48 horas en agitación (180 rpm) a 30°C, las metodologías utilizadas para cuantificar los sideróforos, fueron espectrofotométricas; para la cuantificación de pioverdinas se ocupó la metodología reportada por Page y Huyer, 1984, y para la cuantificación de catecoles fue la descrita por Barnum, 1977, se cuantificó proteína con el método de Lowry, 1951, para la normalización de los datos. Los resultados registrados para la biosíntesis de pioverdinas, se encontró que la cepa tipo AEIV presentó la mayor producción del sideróforo (promedio de 1.031 ug pio/mg proteína), mientras que los aislados presentaron una menor producción, sin diferencia estadística significativa, la cepa SM3.2 (0.780 ug pio/mg proteína) y la cepa S4Ta (0.732 ug pio/mg proteína). En el caso de los catecoles, la cepa tipo AEIV mantiene la mayor producción, con un promedio de 1.553 ug cat/mg proteína y los aislados no presentan una diferencia significativa, la cepa S4Ta produjo 1.514 ug cat/mg proteína y la cepa SM3.2 con 1.494 ug cat/mg proteína. Se puede concluir que, *Azotobacter sp.* es capaz de producir dos tipos de sideróforos en ausencia total de hierro, la cepa tipo AEIV produce catecoles y pioverdinas de forma similar a la producción de los aislados SM3.2 y S4Ta.

INTRODUCCIÓN

Las bacterias del género *Azotobacter* son Gram negativas, aerobias estrictas, viven en suelos y aguas frescas, son células de 1.5 a 2 µm que presentan características pleomórficas. *Azotobacter*

tiene un ciclo de vida complejo, la forma vegetativa es bacilar y en respuesta a condiciones ambientales perjudiciales, forman células metabólicamente inactivas, conocidas como quistes, que le confiere resistencia a la desecación (Jayashree, 2022). Son bacterias quimioorganotróficas que utilizan azucares, alcoholes y sales inorgánicas para crecer, se les observa como células individuales o formando agregados y en ocasiones cadenas de tamaños variables (Espín, 2014). *Azotobacter vinelandii* es una bacteria poliploide, que posee hasta 80 copias del cromosoma por célula (Noar y Bruno, 2018), el número de copias varía en función del medio cultivo, las condiciones y la fase de crecimiento en la que se encuentre la bacteria.

Azotobacter es una bacteria diazótrofa que produce tres complejos enzimáticos para fijar nitrógeno, como la nitrogenasa de molibdeno (Mo), nitrogenasa de vanadio (V) y nitrogenasa de hierro (Fe), estas nitrogenasas mantienen una coordinación durante el ensamblaje de productos génicos y regulación de la fijación de N_2 (Jayashree, 2022). La fijación de nitrógeno en *A. vinelandii* es paradójica, puesto que la nitrogenasa es extremadamente sensible al oxígeno y tiene una alta tasa de respiración en comparación con otras bacterias, específicamente cuando fija nitrógeno, lo que asegura la protección respiratoria de la nitrogenasa (Aasfar *et al*, 2021).

El transporte de carbohidratos se lleva a cabo por un mecanismo de transporte activo, la glucosa se metaboliza por la vía Etner-Duodoroff (ED). Las fuentes de carbono que degrada comúnmente son la sacarosa, glucosa, galactosa y fructosa (Cuesta *et al*, 2005). *A. vinelandii* es reconocido por sus capacidades metabólicas y genéticas, como fijar el nitrógeno en presencia de oxígeno y a su vez activar mecanismos de protección de nitrogenasa, sintetiza alquilresorcinoles, además produce polímeros de uso industrial: alginatos y polihídroxibutirato (PHB) intracelular (Espín, 2014).

A. vinelandii se considera una rizobacteria promotora del crecimiento vegetal (PGPR por sus siglas en inglés, Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), capaz de colonizar la rizosfera y volver biodisponible el Fe a las plantas, quela iones férricos en condiciones deficientes de hierro, a través de la síntesis y liberación de sideróforos en condiciones de deficiencia de hierro biodisponible, logrando aumentar y regular la biodisponibilidad de hierro en la rizosfera (Timofeeva *et al*, 2022).

Al momento de colonizar la rizosfera, *A. vinelandii* mejora el crecimiento y valor nutricional de las plantas, por acción de la fijación de nitrógeno y liberación de fitohormonas como el ácido indol acético (Sumbul *et al*, 2020). El efecto positivo en el crecimiento de las plantas se atribuye a una mayor tolerancia al estrés biótico, pues *A. vinelandii* puede actuar como agente de biocontrol (Rosa *et al*, 2023). El ácido indol acético es la principal auxina en plantas, ya que controla diversidad de procesos fisiológicos de gran importancia, como son la división celular, diferenciación tisular y las respuestas a la luz y la gravedad (Cólo *et al*, 2013). Muchas bacterias promotoras del crecimiento vegetal como *Bacillus* spp, *Pseudomonas* spp y *Azotobacter* spp, poseen la capacidad de producir ácido indol acético.

El enfoque que se le da a *A. vinelandii* se basa en su importancia como modelo bacteriano que regula la biodisponibilidad de hierro y producción de fitohormonas, que impacta en la agronómica y el ambiental, puesto que *Azotobacter* está distribuido globalmente y contribuye a la fijación biológica de nitrógeno en una amplia gama de condiciones (Aasfar *et al*, 2021).

TEORÍA

El hierro es un nutriente indispensable para las células eucariotas y procariotas debido a su participación como un cofactor en reacciones de oxido-reducción en procesos celulares fundamentales, como son la replicación, reparación del ADN, respiración celular, fotosíntesis, transporte de oxígeno y fijación biológica del nitrógeno (Kasheii *et al*, 2021). Debido a la presencia de oxígeno en la atmósfera, la biodisponibilidad del hierro ferroso (Fe^{2+}) se ve afectada por su oxidación a hierro férrico (Fe^{3+}), volviéndose insoluble al pH fisiológico (Rosa *et al*, 2023). La deficiencia de hierro representa el trastorno nutricional más común en humanos y plantas, afectando la salud humana y la calidad nutricional de los cultivos. Por lo anterior, la baja biodisponibilidad del hierro ha condicionado a que diversos organismos desarrollaran mecanismos especializados para

adquirir hierro y gestionar su homeostasis para mantener los procesos dependientes del hierro (Romero *et al*, 2021).

En plantas el hierro es necesario para la síntesis y funcionamiento del aparato fotosintético; en contraste, la ausencia de hierro en las plantas provoca la aparición de manchas amarillas en las hojas jóvenes como resultado de una producción deficiente de clorofila (Ferreira *et al*, 2019), a esto se le conoce como clorosis. Como alternativas para contrarrestar la clorosis, se ha optado por el uso de agentes quelantes orgánicos, entre ellos los ácidos aminopolicarboxilicos, considerados agentes quelantes fuertes que no son biodegradables, lo que presenta una problemática por su persistencia en los mantos acuíferos, por su capacidad para movilizar metales tóxicos (Martins *et al*, 2018).

Recientemente, se ha implementado la búsqueda de quelantes de hierro que puedan ser degradados en el ambiente, por lo que los compuestos considerados eficientes hasta el momento han sido los sideróforos, moléculas de bajo peso, entre 500 y 1500 Da, que presentan una gran afinidad y selectividad para unirse al Fe (III), son comúnmente producidos por bacterias, hongos y plantas monocotiledóneas en respuesta al estrés por hierro (Pérez *et al*, 2007). La afinidad de los sideróforos al Fe es muy alta y puede eliminar proteínas de unión a Fe como ferritina y transferrina; los sideróforos toman el Fe unido a proteínas o de compuestos solubles en agua y lo convierten a una forma de Fe accesible para los microorganismos (Timofeeva *et al*, 2022).

Los sideróforos se pueden clasifican según el grupo funcional con el que interactúa con el hierro, en los sideróforos microbianos se clasifican como catecolatos, hidroxamatos y carboxilatos, según la naturaleza química de sus sitios de unión al hierro (Pérez *et al*, 2007).

La bacteria *A. vinelandii* es considerada un organismo modelo en producción de sideróforos, a través del complejo Fe-sideróforo, la captación del Fe, se realiza a través de los receptores unidos a la membrana de *A. vinelandii*, obteniendo Fe soluble, dichos complejos no son disponibles para los organismos competidores y exhibe actividades inhibidoras para el crecimiento de fitopatógenos (Baars *et al*, 2016), además los sideróforos pueden unir metales distintos al Fe y permiten la absorción de metales adicionales requeridos en los complejos de nitrogenasas (Mo, V) o incluso secuestrar metales pesados tóxicos, como el tungsteno (W) y zinc (Zn) (Aasfar *et al*, 2021).

Por otro lado, los sideróforos que produce *A. vinelandii* incluye al compuesto fluorescente azotobactina, que posee una cadena peptídica unida a un cromóforo, que tiene la capacidad de emitir fluorescencia (Basulto, 2020), la azotobactina es clasificada como un sideróforo mixto de tipo pioverdina y el sideróforo catecolato: azotoquelina, aminoquelina, protoquelina y DHBA (ácido dihidroxibenzoico)(Robson *et al*, 2015), que en su estructura presenta el grupo catecol característico; existe la posibilidad de que *A. vinelandii* pueda secretar aún más sideróforos diferentes de los reportados, hasta el momento estos cinco sideróforos son los que se han descubierto y caracterizado a lo largo de 30 años, haciendo uso de ensayos químicos que permiten el análisis de uno o varios sideróforos a la vez (Baars *et al*, 2016).

El sideróforo azotobactina es producida sola bajo condiciones de limitación severa de Fe, por lo que se le considera el sideróforo “verdadero” de *A. vinelandii*; de forma similar la pioverdina en *Pseudomonas* ha sido ampliamente estudiada por su papel en la adquisición de hierro, mientras que en *A. vinelandii* se requiere estudios más profundos (Wichard *et al*, 2009).

Diversos trabajos han demostrado que *A. vinelandii* comparte genes putativos involucrados con la producción de sideróforos en bacterias como *Pseudomona aeruginosa*, *Bacillus subtilis* y *E. coli*. (Tindale *et al*, 2000). En *P. aeruginosa* se describieron dos operones, cuyos transcritos permiten la producción, ensamblaje y transporte de sideróforos, para los catecoles el operón involucrado en su síntesis es el operón *ent*, entre sus genes agrupados se encuentra el gen *csbC* que codifica una isocorismato sintasa y el gen *csbX* que codifica una bomba de flujo encargada de internalizar el complejo Fe-sideróforo, ambos genes comparten la misma región reguladora (Page *et al*, 2003).

La síntesis de catecoles comienza con la isocorismato sintasa que sintetiza el anillo corísmico, el cual se convierte en ácido 2,3-dihidroxibenzoico (DHBA) por la iscorismatasa, enzima codificada por

el gen *entB*, después se llevaran a cabo modificaciones químicas que dan lugar a la formación de los catecoles restantes (Balado, 2009).

Para pioverdinas se ha identificado en un operón que presenta genes similares a los genes involucrados en la producción de azotobactina, el operón *pvd*, en el cual participa el gen *pvdL*. La ruta de la síntesis no ha sido descrita por completo, pero debido a la homología que presentan las proteínas de *A. vinelandii* respecto a las proteínas encargadas de la producción de pioverdina en *Pseudomonas* es posible sugerir cómo se compone la vía biosintética. Una parte de la estructura de dichas proteínas se compone de una cadena polipeptídica que es sintetizada por sintasas peptídicas no ribosomales (NRPS), enzimas multidominio que cumplen funciones de síntesis específicas (Balado, 2009).

Para este proyecto se trabajó con aislados de la bacteria *Azotobacter* sp. las cepas tipo *A. vinelandii* AEIV y la cepa de *A. vinelandii* S4Ta, así como la cepa de *A. chroococcum* SM3.2 el aislamiento se realizó a partir de los muestreos en la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán; posterior a su procesamiento por tamizados, se aisló a partir de muestras de suelo de tetecho (*A. vinelandii* S4Ta) y muestras de suelo de la mesquitera (*A. vinelandii* SM3.2) empleando el uso de medios de cultivo Burk-Sacarosa (BS), tanto en medio líquido como en medio sólido.

PARTE EXPERIMENTAL

Formulación de medios

El medio Burk-Sacarosa (BS) es un medio de cultivo mínimo que es utilizado comúnmente para el crecimiento de bacterias del género *Azotobacter*, la formulación del medio está constituida por sacarosa al 20% (200 g/l) es la fuente de carbono, después la solución de buffer fosfatos de un stock de 8 g/l de fosfato dipotásico (K_2HPO_4) y un stock de 2 g/l de fosfato mono potásico (KH_2PO_4), dicha solución debe estar previamente ajustada a un pH de 7, las siguientes sales en agregarse son cloruro de calcio ($CaCl_2$) en un stock de 7.3 g/l, sulfato de sodio ($NaSO_4$) en un stock de 18.3 g/l, cloruro de magnesio ($MgCl_2$) en un stock de 160 g/l, sulfato de hierro ($FeSO_4$) en un stock de 5 g/l y por ultimo molibdato de sodio ($NaMoO_4$) en un stock de 0.2 g/l, agregar 16 g/l de agar bacteriológico para preparar medio sólido. Para la preparación del medio BS en ausencia de hierro (SFe) simplemente no se agrega el $FeSO_4$.

Crecimiento de preinóculos e inóculos

Se comenzó con el crecimiento de las cepas de *A. vinelandii* AEIV, *A. vinelandii* S4TA *y A. chroococcum* SM3.2 en medio BS sólido, se incubaron por 48 horas a 30°C y se almacenaron las cepas en refrigeración para detener el crecimiento; posteriormente se tomaron colonias de cada cepa y se inocularon en 25 ml de medio líquido BS en tubos Falcón de 50 ml, realizando duplicados de cada cepa, dichos preinóculos se incubaron en agitación de 160 rpm a 30°C por 24 horas, una vez crecidos los preinóculos, se tomaron muestras de 14 ml, se centrifugaron a 8000 rpm por 6 min, se decantó el sobrenadante y se obtuvo el paquete celular de cada muestra, se agregó 1 ml de $MgSO_4$ 10mM y se resuspendió en un vórtex, para centrifugar y retirar el sobrenadante, posteriormente se resuspendió en 1 ml de $MgSO_4$ 10 mM y de esta suspensión se tomó 100 µl para inocular en los triplicados de la cepa, en cada cepa se evaluaron triplicados de medio BS SFe, se inoculo cada matraz y se incubaron en agitación de 160 rpm a 30°C por 48 horas (Fig.1).

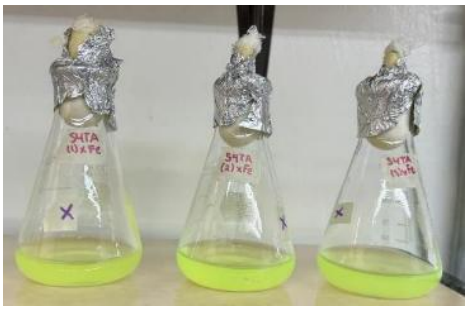


Fig. 1 Inóculos de la cepa *A. vinelandii* S4Ta en tratamiento BS en ausencia de hierro, de 48 horas.

Cuantificación de pioverdinas

Para determinar los sideroforos tipo pioverdinas, se siguió la metodología reportada por Page y Huyer, 1984, se tomaron muestras de 5 ml y se centrifugaron a 8000 rpm por 6 minutos, se transfirió el sobrenadante de las muestras a un nuevo tubo para posteriormente acidificar las muestras con HCl 5N hasta que el pH disminuya a 2, por último, estas muestras se leyeron en un espectrofotómetro y se midió su absorbancia a 380 nm.

Cuantificación de catecoles

Para la cuantificación de catecoles, se utilizó la metodología descrita por Barnum, 1977, fue necesario tomar muestras de 400 µl de los sobrenadantes obtenidos de los inóculos crecidos de los triplicados de cada medio evaluado, a cada muestra se le adiciono 200 µl de buffer acetatos 3M y 200 µl de solución Nitrito-Molibdato 0.1 M, se dejó incubar a temperatura ambiente por 30 minutos y por último se midió la absorbancia de las muestras a 508 nm.

Determinación de proteínas por el método de Lowry

Para poder calcular la producción de los sideróforos es necesario normalizar con la cuantificación de proteína de cada muestra, siguiendo el método de Lowry, 1951, por lo que se tomó 1 ml de los inóculos, dichas muestras se centrifugaron a 12000 rpm por 2 min, se retiró el sobrenadante y el paquete celular se resuspendió con 1 ml de $MgSO_4$ 10 mM, posterior a esto se tomó 10 µl de cada muestra y se llevó a un volumen final de 200 µl con agua tridestilada, a su vez se corrió una curva de calibración con albumina, a cada muestra de albumina se llevó a un volumen de 200 µl con su respectiva cantidad de albumina sérica; después se añadió 1 ml de solución reactiva, se vórtexeo cada muestra y se incubo por 10 min, posteriormente se agregó 100 µl de reactivo folín y se incubo por 30 minutos cada muestra, por último se midió la absorbancia de las muestras a 625 nm.

RESULTADOS

Las cepas *A. vinelandii* AEIV, *A. vinelandii* S4Ta y *A. chroococcum* SM3.2, se sembraron en condiciones de ausencia de hierro para estimular la producción de sideróforos. Las cepas cultivadas en medio BS líquido en ausencia de hierro, con 48 horas de incubación se observó una evidente fluorescencia emitida por las cepas.

Los resultados registrados para la producción de pioverdinas con ausencia de hierro en el medio de cultivo, para la cepa *A. vinelandii* AEIV se reportó una producción de 1.031 ug/mg pioverdina, este fue el mayor valor registrado y sin diferencia estadísticamente significativa, respecto a la producción similar de pioverdinas de los aislados *A. vinelandii* S4Ta y *A. chroococcum* SM3.2 (0.732 y 0.780 ug/mg pioverdina, respectivamente) sin diferencia estadística significativa (Fig.2).

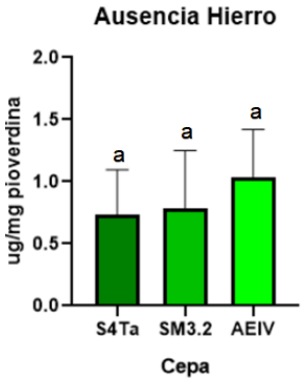


Fig. 2 Producción de pioverdinas (ug/mg) a las 24 hrs de las cepas *A. vinelandii* AEIV, *A. chroococcum* SM3.2 y *A. vinelandii* S4Ta en medio BS en ausencia de hierro.

En cuanto la producción de catecoles en ausencia de hierro en el medio de cultivo se registró con una mayor producción a la cepa *A. vinelandii* AEIV (1.553 ug/mg catecol), pero sin diferencia estadísticamente significativa con respecto a la producción de catecoles de los aislados *A. vinelandii* S4Ta y *A. chroococcum* SM3.2 (1.514 y 1.494 ug/mg catecol, respectivamente) (Fig.3).

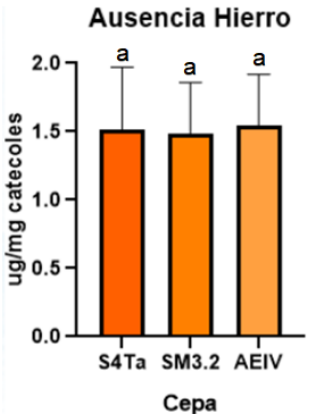


Fig. 3 Producción de catecoles (ug/mg) a las 24 hrs de las cepas *A. vinelandii* AEIV, *A. chroococcum* SM3.2 y *A. vinelandii* S4Ta en medio BS en ausencia de hierro.

CONCLUSIONES

Las tres cepas de *Azotobacter* sp. son capaces de producir dos tipos de sideróforos en condiciones de ausencia total de hierro, las pioverdinas y los catecoles, así como la producción de los sideróforos es diferencial, con una producción mayor de catecoles con respecto a las pioverdinas, la cepa tipo *A. vinelandii* AEIV produce catecoles y pioverdinas de forma similar a los aislados *A. vinelandii* S4Ta y *A. chroococcum* SM3.2.

BIBLIOGRAFÍA

Jayashree, S. (2022). *Evaluation of Azotobacter vinelandii growth in Continuous Culture* (Doctoral dissertation, RMIT University).

Espín, G. (2014). *Biología de Azotobacter vinelandii*. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Noar, J., Bruno, J. (2018). *Azotobacter vinelandii: the source of 100 years of discoveries and many more to come*. Microbiology, 643, 1-17.

Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., Meftah, I. (2021). *Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potencial Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability.* Front. Microbiol. 12, 628379.

Cuesta, A., Monsalve, J., Mesa, M., Zapata, A., Trujillo, M. (2005) *Estrategias de cultivo en la producción de alginatos por Azotobacter vinelandii*. Universidad Nacional de Colombia.

Timofeeva, A., Galyamova, M., Sedykh, S. (2022) *Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture*. Plants, 11, 3065.

Sumbul, A., Ali, R., Rizvi, R., Mahmood, I. (2020). *Azotobacter: A potential bio-fertilizer for soil and plant health management*. Saudi Journal of Biological Sciences. 27, 3634-3640.

Rosa, E., Echavarri, C., Armas, A., Escudero, V., Poza, C., Rubio, L., González, M. (2023) *Iron Homeostasis in Azotobacter vinelandii*. Biology, 12, 1423.

Colo, J., Hajnal, T., Duric, S., Stamenov, D., Hamidovic, S. (2013). *Plant Growth Promotion Rhizobacteria in Onion Production*. Polish Journal of Microbiology, 63, 83-88.

Kasheii, B., Pezhman M., Abdolmajid M. (2021). *Siderophores: Importance in bacterial pathogenesis and applications in medicine and industry*. Microbiological Research, Volume 250, 126790.

Romero, A., Martínez, M., Puig, S. (2021). *Iron in Translation: From the Beginning to the End*. Microorganisms, 9(5), 1058.

Ferreira, C., Vilas, Á., Sousa, C., Soares, H., Soares, E. (2019) *Comparison of five bacterial strains producing siderophores with ability to chelate iron under alkaline conditions*. AMB Express, 9:78.

Martins, J., Martin, C., Hernandez, L., Barros, M., Vieria, H., Lucenas, J. (2018). *Azotochelin and N-dihydroxy-N, N'-diisopropylhexanediamide as Fe sources to cucumber plants in hydroponic cultures*. Emirates Journal of Food and Agriculture, 30, 65-76.

Pérez, S., Cabirol, N., George, R., Zamudio, L., Fernández, F. (2007). *O-CAS, a fast and universal method for siderophore detection*. Journal of Microbiological Methods. 70, 127-131.

Robson, R., Jones, R., Robson, R., Schwartz, A., Richardson, T. (2015). *Azotobacter Genomes: The Genome of Azotobacter chroococcum NCIMB 8003 (ATCC 4412).* PLoS One.10(6), 0127997.

Tindale, A., Mehrotra, M., Ottem, D., Page, W. (2000) *Dual regulation of catecholatesiderophore biosynthesis in azotobacter vinelandii by iron and oxidative stress*. Microbiology, 146, 1617-1626.

Basulto, M. (2020) *Estudio de la regulación ejercida por GacA y RsmA en la síntesis de sideróforos en Azotobacter vinelandii* (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Page, W., Kwon, E., Cornish, A., Tindale, A. (2003) *The csbX gene of Azotobacter vinelandii encodes an MFS efflux pump required for catecholate siderophore export*. FEMS Microbiology Letters, 228, 211-216.

Balado, M. (2009) *Caracterización de un nuevo sistema de asimilación de hierro mediante sideróforos en Vibrio anguillaru* (Tesis Doctoral). Universidad de Santiago de Compostela.

EFECTO DEL USO DE DESINFECTANTES EN GRANOS DE CAFÉ EN BABA

Yasmin Serrano Morales[1], Minerva Rosas Morales[1], Ada María Ríos Cortés[1], Paula Montserrat Barrera Crespo

[1]Instituto Politécnico Nacional - CIBA, [2]Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros
yaz.30.06.01@gmail.com

RESUMEN

México es uno de los principales exportadores de café del mundo, con la mayor producción concentrada en las regiones centro-sur del país. Así mismo, es uno de los productos más consumidos a nivel mundial, su calidad y su seguridad son fundamentales para garantizar salud al consumidor (Slow Food, 2023).

Durante el beneficiado del café, la presencia y desarrollo de microorganismos no deseados puede afectar significativamente la calidad y sabor, durante la fermentación natural del café ocurren diferentes procesos bioquímicos. Un factor importante para la producción de cafés de especialidad es la fermentación controlada, ya que permite desarrollar sabores complejos, mejorar la calidad del grano y ofrecer una consistencia en el producto final (Jaramillo, 2023).

Sin embargo, el empleo ácido per acético, peróxido de hidrógeno y ácido acético, puede tener impacto significativo en los azúcares presentes y finalmente en la calidad del grano. El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos del uso de desinfectantes como ácido per-acético, peróxido de hidrógeno, y ácido acético en granos de café, así como verificar la presencia o ausencia de microorganismos que puedan dañar o alterar el sabor en taza. Se hizo uso de bactericidas como ácido acético comercial, ácido per-acético, peróxido de hidrógeno para reducir las poblaciones microbianas nativas del grano de café, para poder usar inoculados con bacterias que puedan acelerar la fermentación aportando características sensoriales diferentes; Para ello se obtuvieron muestras de café de la Sierra Nororiental de Puebla, específicamente de la comunidad de Totutla del municipio de Huitzilan de Serdán, en los periodos de cosecha Noviembre-Marzo 2024; de la variedad Marsellesa cultivada a 1,100 msnm. Dentro de la metodología empleada, se utilizaron tubos con 9ml de cada desinfectante a dos concentraciones 0.3, 0.5% donde se añadieron 2 g de café en baba y se mantuvieron en agitación durante 10 minutos, posteriormente se lavaron con una solución de 9ml de agua destilada estéril. Para finalmente analizar el contenido de azucares reductores por Ácido-dinitrosalicílico (DNS), así como la siembra en placa con agar MRS posterior al periodo de incubando a 25° por 48 h. se verifico la presencia o ausencia de microorganismos,

Los resultados obtenidos fueron contundentes ya que el peróxido de hidrogeno a una concentración de 0.3% ayuda con la minimización de microorganismos sin embargo también afecta al contenido de azucares, la concentración obtenida de g/L de la determinación por DNS fue de 0.809 g/L, mientras que a una concentración de 0.5%, el contenido fue de 0.804 g/L; para el ácido per-acético 0.3%, 0.5% se obtuvo 0.804 y 1.089 g/L respectivamente; finalmente ácido acético 0.3, 0.5% fue de 0.978 y 0.793 g/L. Por lo que se concluye que la solución de ácido per-acético a 0.5% es la ideal para la minimización de poblaciones sin afectar el contenido de azucares de la muestra de café en baba.

INTRODUCCIÓN

El café es una bebida ampliamente consumida en todo el mundo, se obtiene a partir de los granos tostados de la planta de café, principalmente de las variedades *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (o bien robusta). Estas plantas producen frutos conocidos como cerezas, mismas que contienen dos semillas, a lo que se le conoce como granos de café (Admin *et al*., 2022).

Para la obtención de estos granos de café, se llevan a cabo diferentes procesos donde la más importante es la fermentación o "beneficiado húmedo". Este proceso es fundamental para garantizar la calidad del producto final el cual llega al consumidor (Borém *et al*., 2014).

La calidad de este café, depende en gran medida de un buen proceso post-cosecha, es ahí donde surge la fermentación (Vaughan *et al*., 2015). Durante este proceso, el café adquiere un perfil sensorial distintivo, además de que se produce la degradación del mucílago del café (Kang et al., 2019). Esto gracias a levaduras y bacterias que, en conjunto con otros microorganismos, trabajan para producir metabolitos de relevancia en la obtención de estos aspectos sensoriales. El proceso de beneficiado, así como la variedad; condiciones de cultivo; tostado; y la microbiota nativa durante este proceso tienen un impacto directo en el perfil sensorial del café (Silva et al., 2010)

Alrededor de los años se ha destacado el uso de cultivos iniciadores durante el proceso de fermentación. Así mismo en distintos reportes, se habla de estas fermentaciones utilizando cepas puras seleccionadas para mejorar las características organolépticas del café. Donde se realizaron análisis de levaduras y bacterias, así como su impacto en el perfil sensorial a través de fermentaciones controladas (Pereira G et al., 2014). Sin embargo, para asegurar el desarrollo y acción únicamente de dicho microorganismo o conjunto de microorganismos, se ha implementado el uso de desinfectantes para mejorar la calidad del café, prevenir la propagación de enfermedades y evitar contaminaciones durante el proceso post-cosecha, entre los que destacan ácido per acético, peróxido de hidrógeno y ácido acético en bajas concentraciones (Proquimia, 2024).

El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos del uso de desinfectantes como ácido per-acético, peróxido de hidrógeno, y ácido acético en granos de café, así como verificar la presencia o ausencia de estos microorganismos que puedan dañar o alterar el sabor en taza. Esto tendrá un impacto para la creación de cafés de especialidad los cuales se destacan en el mercado por sus características únicas.

TEORÍA

La calidad del café está intrínsecamente ligada a su perfil sensorial, incluyendo atributos como: aroma, sabor, acidez y cuerpo. La aplicación de cepas puras ofrece la posibilidad de modular de manera específica estas características, permitiendo la creación de perfiles sensoriales definidos en taza.

La búsqueda en la generación de sabores y aromas en la etapa de beneficiado del café, es un reto importante, debido a que principalmente debe realizarse una minimización de la microbiota nativa para garantizar que el cultivo puro sea el que actúe sobre la degradación de azúcares presentes en el mucílago de café, así mismo generando compuestos fenólicos, volátiles, alcoholes y ácidos orgánicos. De la misma manera asegurando que los desinfectantes utilizados no afecten de manera significativa estos azúcares, y puedan generar ciertos perfiles desagradables.

PARTE EXPERIMENTAL

Las muestras de café se recolectaron de la Sierra Nororiental de Puebla, específicamente de la comunidad de Totutla municipio de Huitzilan de Serdán, cultivada a 1,100 msnm, durante la cosecha 2024-2025.

Recolección y despulpe de muestra (Cereza de café)

Se colectó muestra de café en cereza, para posteriormente realizar un proceso de despulpe. Donde se retira la pulpa que recubre el grano, a lo que se le conoce como café en baba.

Figura 1. Cereza de café (Imagen propia)

Figura 2. Grano de café en baba

Preparación de soluciones desinfectantes:

Control: Granos de café en baba + agua destilada

1. Solución (a): Ácido per acético 0.3, 0.5%
2. Solución (b): Peróxido de hidrógeno 0.3, 0.5%
3. Solución (c): Ácido acético 0.3, 0.5%
4. Solución base (1): Agua destilada estéril
5. Solución base (2): Caldo nutritivo

Colocación de muestra (granos de café en baba) en las soluciones:

1. Se tomaron 3 g de café en baba
2. Se colocaron en la solución a, b y c durante 10 min, respectivamente.

Una vez cumplidos los 10 minutos, se tomaron nuevamente los granos y se colocaron en el tubo con la solución base 1) Agua destilada estéril, manteniendo agitación durante 5 min, para colocarlas en la solución base 2) Caldo nutritivo, dejar reposar durante 1 minuto.

Figura 3. Granos de café en baba

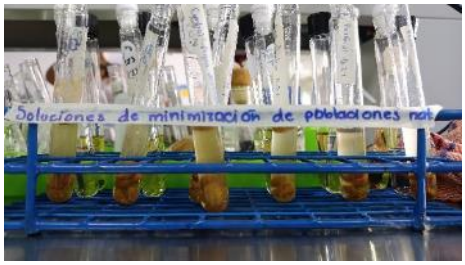


Figura 4. Solución minimización con granos de café

Determinación de azúcares reductores por método 3,5-Ácido dinitrosalicílico (DNS)

La técnica del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) es ampliamente utilizada para la cuantificación de azúcares reductores debido a su sensibilidad y simplicidad. Este método colorimétrico, fue

desarrollado por Miller en 1959, y se basa en una reacción redox donde los azúcares reductores reducen el DNS a ácido 3-amino-5-nitrosalicílico, generando un cambio de color (DÍAZ, Y. 2020.)

Preparación de las soluciones patrón de glucosa para la curva de calibración

[ ]	Sol. Stock	Agua
2.0 g/L	250 µl	
1.7 g/L	850 µl	150 µl
1.5 g/L	750 µl	250 µl
1.0 g/L	500 µl	500 µl
0.7 g/L	350 µl	650 µl
0.5 g/L	250 µl	750 µl

Nota: Elaboración propia

Se preparó la solución patrón de glucosa con las siguientes concentraciones: 0; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 1,7, y 2,0 g/L. Se añadieron 250 µL de cada solución; ácido per acético, peróxido de hidrógeno, ácido acético y 250 µL del reactivo DNS en tubos tapa rosca cubiertos con papel aluminio para proteger la reacción de la luz. Los tubos se colocaron en un baño termostático a 92 °C por cinco minutos. Así mismo se detuvo la reacción por enfriamiento en hielo por cinco minutos y se agregaron 2,5 ml de agua destilada a cada tubo, se agitaron y se realizó la lectura de la absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro. La Tabla 1 muestra en resumen las cantidades agregadas de glucosa, reactivo y agua destilada para cada muestra:

Tabla 1. Metodología para elaborar la curva patrón de glucosa. Burgos Montañez, L. J. (2020)

Reactivo	Blanco	Concentración (g/L)					
		0,5	0,7	1,0	1,5	1,7	2,0
Glucosa (mL)	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Agua (mL)	0,25	-	-	-	-	-	-
Reactivo DNS (mL)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Agua destilada (mL)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Figura 5. Soluciones, curva de calibración DNS.

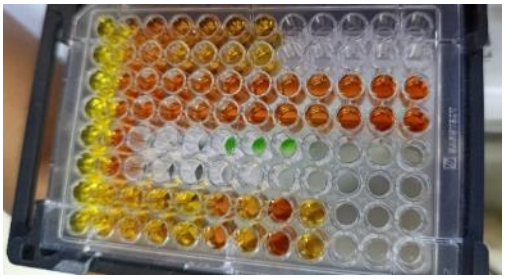


Figura 6. Placa de 96 pozos con muestras

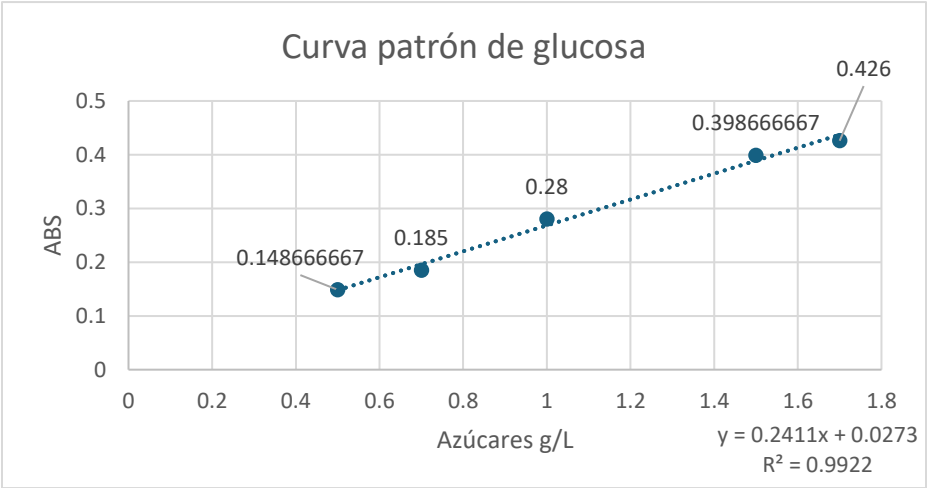
Plaqueo de muestra en agar MRS e incubación por 48 h a 30 °C

Se plaquearon los granos de café tratados con las soluciones desinfectantes en placas con agar MRS, posteriormente se incubaron a 30 °C durante 48 h.

RESULTADOS

Curva de calibración de glucosa

Luego de preparar las soluciones de glucosa y hacerlas reaccionar con el DNS, se procedió a medir las absorbancias de las soluciones de glucosa de 0,5; 0,7; 1; 1,5; 1,7, y 2 g/L en un espectrofotómetro y graficar los resultados. La curva de calibración se realizó para determinar la concentración de azúcares reductores en las muestras de café en baba con las soluciones de ácido per acético, peróxido de hidrógeno y ácido acético, y así cuantificar los azúcares presentes.



Nota: Gráfica de elaboración propia

Se graficaron los datos y determinó la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación (R^2), donde se observó un valor igual a 0,9922. Lo que indica que si el coeficiente de correlación es cercano a 1 existe una perfecta correlación entre los datos al relacionar la concentración con la absorbancia y alta confiabilidad en los datos obtenidos.

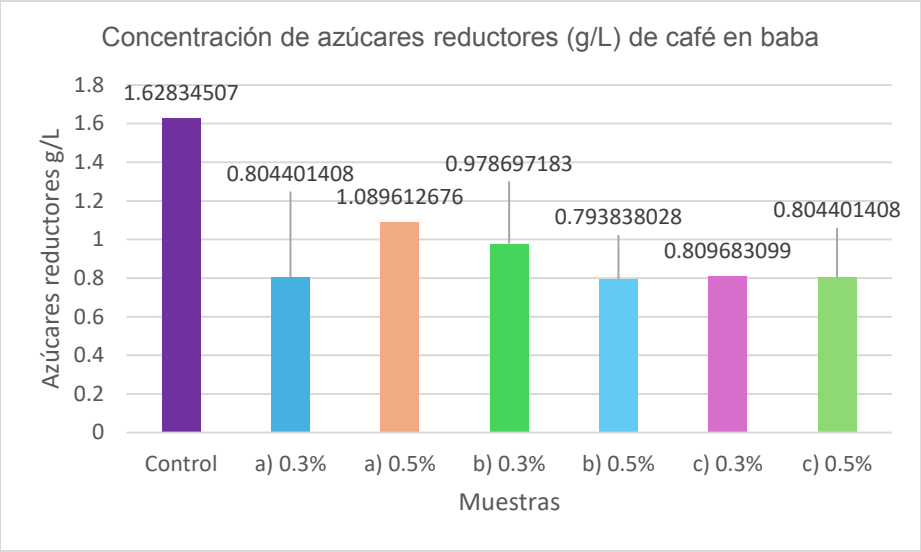


Gráfico 1. Concentración de azúcares reductores de café en baba respecto a las soluciones desinfectantes

Minimización de microbiota nativa

Los resultados obtenidos de la minimización de la población nativa fueron contundentes, donde el peróxido de hidrógeno a concentración de 0.3% disminuye la población de microorganismos presentes, sin embargo, afecta el contenido de azúcares de 1.628 g/L a 0.809 g/L, mientras que a una concentración de 0.5%, el contenido fue de 0.804 g/L; finalmente con ácido per-acético al 0.3% y 0.5% se obtuvieron concentraciones de azúcares de 0.804 y 1.089 g/L respectivamente; finalmente para ácido acético al 0.3 y 0.5% se obtuvieron concentraciones de azúcares de 0.978 y 0.793 g/L.

Tabla 2. Poblaciones microbianas en granos de café en baba

Pruebas minimización de poblaciones microbianas							
UFC/ML	Control	Ácido peracético 0.3%	Ácido peracético 0.5%	Peróxido de hidrógeno 0.3%	Peroxido de Hidrogeno 0.5%	Ácido acético 0.3%	Ácido acético 0.5%
7-8				x	x	x	
4-6	X	x					x
1-3			x				

Nota: En la escala de 1 al 8 UFC/mL se califica la eficiencia de las pruebas de desinfección antes mencionadas donde 1-3 significa que la prueba es eficaz en un 60% y 6-8 significa que la prueba no ayuda a la desinfección.

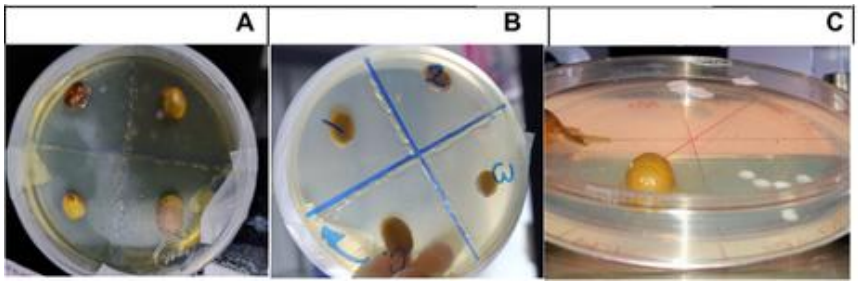


Figura 7. a) Ácido per acético 0.3, 0.5%; b) Ácido acético 0.3, 0.5%; c) Peróxido de hidrógeno 0.3, 0.5%

CONCLUSIÓN

La solución de ácido per-acético a 0.5% es la que género un resultado positivo para la minimización de poblaciones nativas con 60% de efectividad, sin afectar el contenido de azúcares con una concentración de 1.0896 g/L, de la muestra de café en baba, el cual es fundamental para una fermentación dirigida y controlada.

REFERENCIAS

1. Proquimia. (2024, 8 abril). Desinfección de frutas y verduras con ácido peracético. Proquimia.
2. DÍAZ, Y. 2020. “Determinación del contenido de azucares, proteínas y nitrógeno presentes en medios de cultivos modificados para el crecimiento in vitro del hongo colletotrichum sp fitopatógeno del ñame (Dioscórea alata) en montería-córdoba”. Trabajo de grado (Químico). Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias Básicas. Córdoba, Colombia.
3. Geromel c, ferreira lp, guerreiro smc, cavalari aa, pot d, pereira lfp, leroy t, vieira lge, mazzafera p, marraccini p. 2006. Biochemical and genomic analysis of sucrose metabolism during coffee (coffea arabica) fruit development. J exp bot. 57(12):3243– 3258. Eng. Doi:10.1093/jxb/erl084.
4. Puerta g, echeverry j. 2015. Fermentación controlada del café: tecnologías para agregar valor a la calidad. Avances técnicos cenicafé. No. 454. 12 p. Http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/558/1/avt0454.pdf.
5. Haile, m. & kang, w. (2019). The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality. Food quality, 6. Marin, l. Arcila, j. Montoya, e. & olveros , c. (2003). Relación entre el estado de madurez del fruto del café y las características
6. Cuantificación de azúcares reductores del sustrato en residuos de piña con el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico. *Revista De Investigación*, *13*(1), 57–66.

ESTIMULACIÓN DE SEMILLAS DE JITOMATE SALADET MEDIANTE IRRADIACIÓN MAGNÉTICA PARA MEJORAR SU GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO

Liliana Paola Martínez Martínez[1], Josue Gabriel Reyes Delgado[1], Itzia Vanessa Guzmán Rodríguez[1], Brenda Dalila Vázquez Barrera[1], Lisset Herrera Isidrón[1], Daniel Sánchez Guzmán[1], Erika Cervantes Juárez[2].

[1] Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería Campos Guanajuato (UPIIG), [2] Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería Campus "Alejo Peralta" (UPIIAP).

lilimtzmtz24@gmail.com

RESUMEN

El uso de campos magnéticos como tratamiento previo en semillas se ha explorado como una alternativa para mejorar procesos fisiológicos clave durante la germinación. En este trabajo se analizó el efecto de la exposición a campos magnéticos permanentes sobre semillas de jitomate Saladet (*Solanum lycopersicum*), con el propósito de evaluar su influencia en el tiempo de germinación y en parámetros morfológicos durante las primeras etapas del desarrollo. Las semillas tratadas con imanes de neodimio mostraron una reducción en el tiempo de emergencia de aproximadamente un 20 % respecto al grupo control. Además, se observó una mayor longitud de la raíz primaria y un aumento en el número de ramificaciones radiculares, así como un desarrollo foliar más vigoroso. Estos resultados sugieren que la irradiación magnética puede favorecer la etapa inicial de crecimiento vegetal, representando una herramienta útil en el diseño de técnicas sostenibles para el mejoramiento hortícola. El presente estudio contribuye a establecer lineamientos para futuras investigaciones que involucren el uso de estímulos físicos no invasivos en semillas de interés agrícola.

INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum*), particularmente en su variedad Saladet, representa uno de los cultivos hortícolas más relevantes en la agricultura mexicana debido a su alta demanda comercial y valor nutricional. Diversos esfuerzos científicos han estado enfocados en optimizar su rendimiento desde las etapas más tempranas de desarrollo, como la germinación, la cual puede ser significativamente influenciada por factores físicos, químicos y ambientales. Entre las estrategias emergentes destaca la aplicación de campos magnéticos como tratamiento previo a la siembra, con el objetivo de mejorar procesos fisiológicos clave y acelerar el establecimiento de las plántulas.

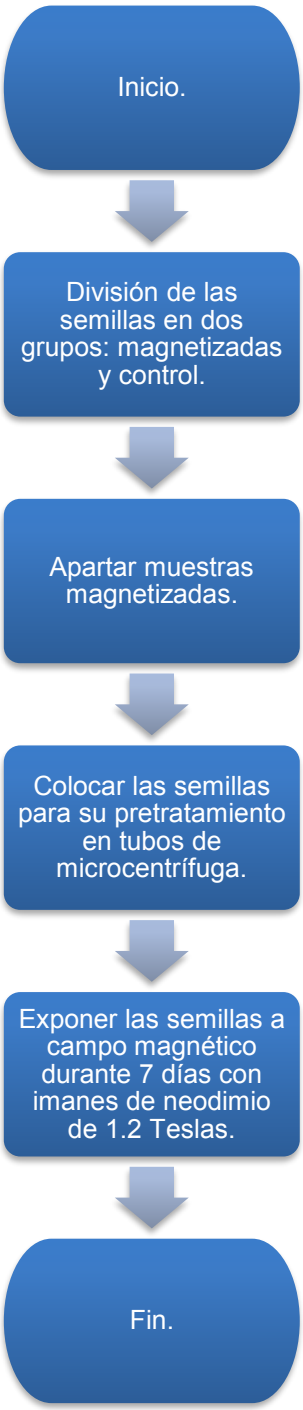
La bioestimulación magnética de semillas se basa en el principio de que la exposición a campos magnéticos puede inducir cambios estructurales y funcionales a nivel celular, mejorando la permeabilidad de las membranas, la activación enzimática y el transporte de nutrientes. Estudios previos han demostrado que esta técnica puede generar efectos positivos en la germinación, el vigor de las plántulas y la morfología radicular de diversas especies vegetales. Por ejemplo, investigaciones como la de Vashisth y Nagarajan (2010) reportaron un incremento significativo en la tasa de germinación y crecimiento inicial de *Helianthus annuus* al aplicar campos magnéticos de baja intensidad, mientras que Hozayn et al., (2014) documentaron beneficios similares en trigo y cebada.

En el caso específico del jitomate, Zamora-Oduardo et al., (2020) observaron mejoras en la producción al aplicar agua magnetizada como sistema de riego, mientras que Chávez-Román (2011) propuso un modelo de estimulación electromagnética como alternativa para incrementar el rendimiento en sistemas de cultivo controlado. Estas evidencias apoyan la hipótesis de que la estimulación magnética previa a la siembra podría inducir beneficios medibles en el desarrollo temprano de esta especie, especialmente en contextos de cultivo in vitro donde es posible aislar variables ambientales.

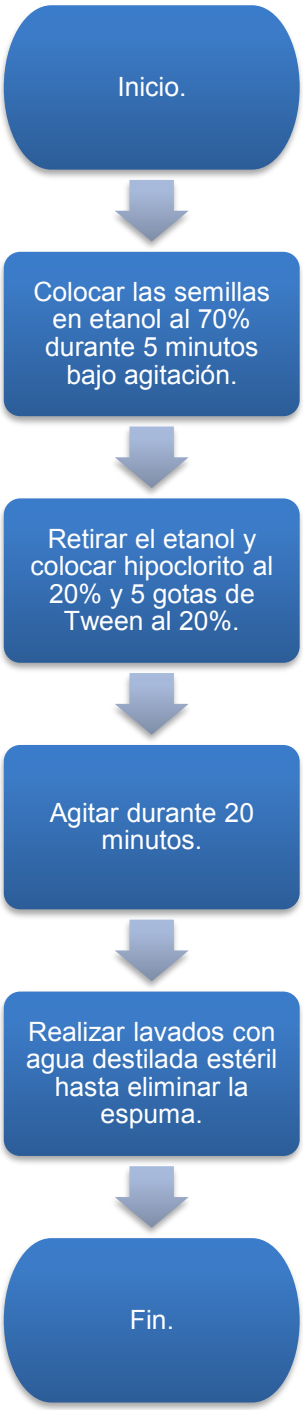
METODOLOGÍA

El experimento se dividió en tres etapas principales (Figura 1): pretratamiento magnético (a), desinfección (b) y cultivo in vitro de semillas (c), las cuáles fueron fundamentales en el proceso completo de ejecución.

a)



b)


Inicio.
Colocar las semillas en etanol al 70% durante 5 minutos bajo agitación.
Retirar el etanol y colocar hipoclorito al 20% y 5 gotas de Tween al 20%.
Agitar durante 20 minutos.
Realizar lavados con agua destilada estéril hasta eliminar la espuma.
Fin.

c)

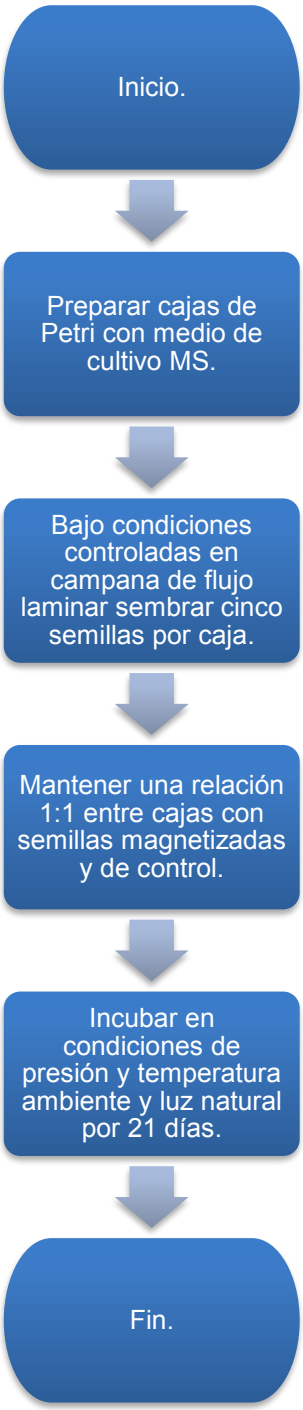


Figura 1. Diagramas de proceso con las tres etapas principales del experimento, donde a) es el proceso de pretratamiento magnético, b) es el proceso de desinfección, y c) es el proceso de cultivo in vitro.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra el resultado final del pretratamiento magnético, desinfección y finalmente su cultivo in vitro a las 0 horas de ser sembrado, es decir, instantes después de que esta ultima acción haya sido realizada. Es importante aclarar que solo se muestra un ejemplo de caja dado que

visualmente no existía una diferencia entre las semillas sin tratamiento y las que tenían el pretratamiento magnético.

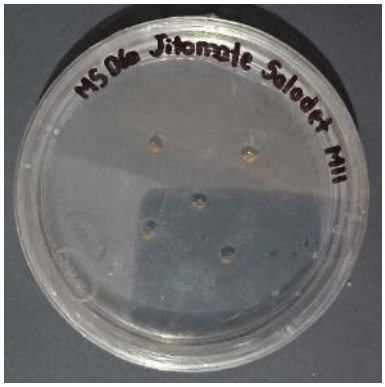


Figura 2. Sistema de cultivo in vitro de cinco semillas de Jitomate Saladet en una caja de Petri con medio de cultivo MS, a las 0 horas post-siembra.

Como se puede observar, no hay algo rescatable en las semillas a excepción del ligero color más oscuro de lo común debido a la humedad presente en cada semilla debido a su lavado, así como también a que el medio MS tiene agua dentro de sus componentes.

Posteriormente, específicamente 9 días después de la siembra, en la Figura 3 se puede observar la germinación después del tiempo ya mencionado, donde se destaca en el inciso b), perteneciente a las semillas que recibieron pretratamiento magnético, como además de que todas las semillas ya habían germinado, como incluso algunas de ellas ya presentaban raíces gruesas así como coloración perteneciente a la clorofila; y por otro lado, las pertenecientes al inciso a), semillas que no recibieron pretratamiento, solo habían logrado la germinación de dos de las muestras con raíces muy delgadas, impacto que será más relevante posteriormente.

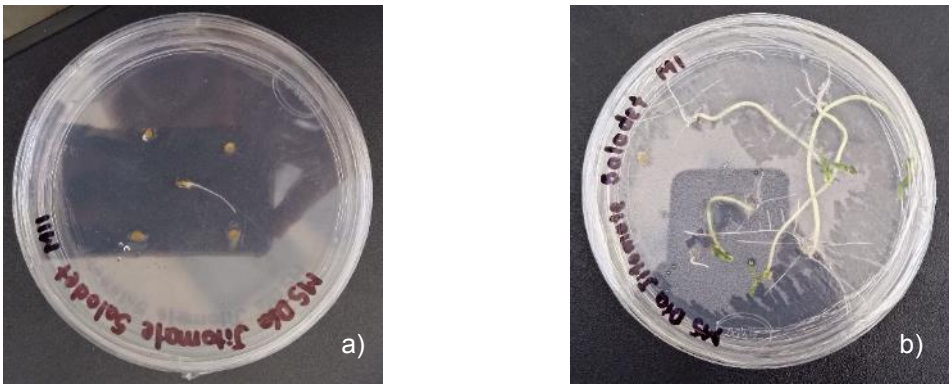


Figura 3. Sistema de cultivo in vitro de cinco semillas de Jitomate Saladet en una caja de Petri con medio de cultivo MS, a los 9 días post-siembra donde a) contiene semillas sin tratamiento y b) contiene semillas con pretratamiento magnético.

Al final de los 21 días se realizaron las observaciones finales, donde se puede observar en la Figura 4 del inciso a) la germinación y crecimiento de las semillas sin tratamiento magnético en las cuáles se puede ver un buen crecimiento y germinación donde tanto las raíces, plántulas y coloraciones son visibles como se esperaría de manera normal. Por otro lado, en el inciso b), se puede observar como las raíces y coloración de las ahora plantas de Jitomate Saladet han crecido con mejores características, además de tener que mudarlas a un recipiente distinto para que siguiera su crecimiento.

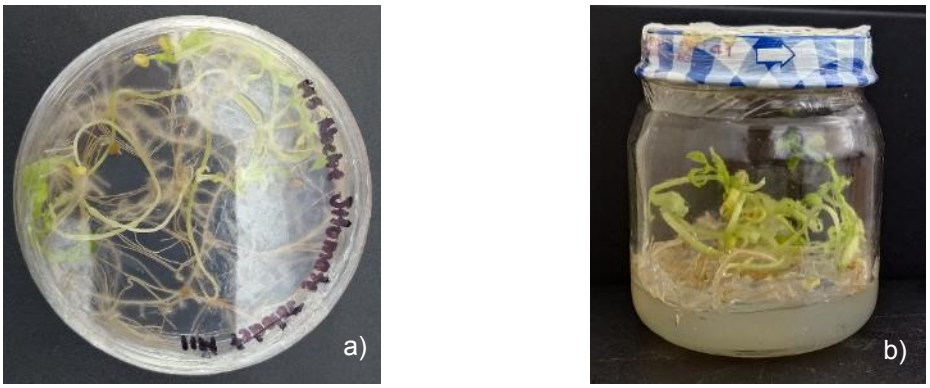


Figura 4. Sistema de cultivo in vitro de cinco semillas de Jitomate Saladet en una caja de Petri con medio de cultivo MS, a los 21 días post-siembra donde a) contiene semillas sin tratamiento y b) contiene semillas con pretratamiento magnético.

Finalmente, en la Figura 5 se presenta la gráfica del porcentaje de germinación contra el paso de los días que pasaron, donde es posible ver claramente el efecto del pretratamiento magnético en la relación de la misma bajo las condiciones prestablecidas.

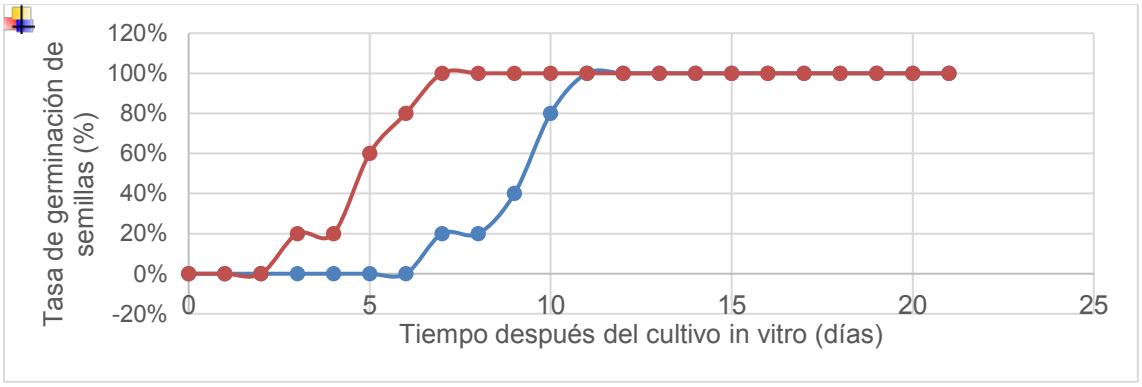


Figura 5. Curva de germinación de las semillas de jitomate Saladet durante 21 días, la línea roja representa las semillas de control mientras la línea azul las semillas magnetizadas.

CONCLUSIONES

En conclusión, se puede afirmar que la irradiación con campo magnético en semillas de jitomate Saladet genera un efecto positivo en diferentes aspectos de su desarrollo, tales como la velocidad de germinación, el ritmo de crecimiento, la emisión de una mayor cantidad de radículas y un notable incremento en la aparición de plántulas. Todos estos resultados representan un parteaguas para futuros estudios orientados a determinar las condiciones óptimas de estimulación para esta variedad de semilla, con el objetivo de establecer un protocolo que pueda ser aplicable de manera consistente a otras semillas de la misma especie.

A futuro, se planea trabajar con otras especies hortícolas, así como explorar distintas intensidades de campo magnético y diferentes formas de irradiación para optimizar sus efectos sobre las semillas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chávez-Román J.J. 2011. Metodología sistémica para incremento de producción de jitomate (Lycopersicon esculentum) con tratamientos electromagnéticos (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional.

2. Zamora-Oduardo D., Rodríguez-Fernández P., Ferrer-Dubois A., Fung-Boix Y., Isaac-Aleman E. y Asanza-Kindelán G. 2020. Producción de tomate (Solanum lycopersicum L.) bajo riego con agua magnetizada en casa de cultivo protegido, Ciencia en su PC. 1: 60–74.
3. Hozayn, M., Abdelraouf, R. E., Abdallaa, M. M., & Swaefy, H. M. (2014). Magnetic field application for improving growth, yield and nutrient uptake of wheat and barley under saline conditions. International Journal of ChemTech Research, 6(1), 121-129.
4. Vashisth, A., & Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (Helianthus annuus) seeds exposed to static magnetic field. Journal of Plant Physiology, 167(2), 149–156. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.011

INFLUENCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE SEMILLAS DE *Echinocactus Grusonii* Y *Lens Culinaris*

Brenda Dalila Vázquez Barrera[1], Itzia Vanessa Guzmán Rodríguez[1], Liliana Paola Martínez Martínez [1], Josué Gabriel Reyes Delgado[1], Lisset Herrera Isidrón[1], Erika Cervantes Juárez[2], Daniel Sánchez Guzmán[1]

[1]Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato del IPN (UPIIG), [2]Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, campus "Alejo Peralta" (UPIIAP), IPN.
Iguzmanr1900@alumno.ipn.mx, Bvazquezb2200@alumno.ipn.mx

RESUMEN

El presente trabajo expone los resultados obtenidos en el estudio del magnetopriming como técnica de mejora fisiológica en la germinación de semillas de *Lycopersicon esculentum* (jitomate saladet y cherry). El magnetopriming consiste en la exposición de semillas a campos magnéticos estáticos de baja intensidad (LMF), con el propósito de inducir respuestas bioquímicas favorables para su desarrollo.

Se llevaron a cabo ensayos comparativos entre muestras control y semillas sometidas a diferentes intensidades y tiempos de magnetización, evaluando parámetros como la tasa de germinación, la velocidad de emergencia de radículas, el desarrollo de hipocótilo y la aparición de hojas cotiledonares. Los resultados mostraron un porcentaje máximo de germinación del 100% en algunas muestras magnetizadas, frente a un 71.42% en las muestras control. Asimismo, se observó una menor incidencia de contaminación fúngica en las semillas tratadas magnéticamente.

El estudio incluyó también ensayos con *Echinocactus grusonii y Lens esculenta* bajo condiciones *in vitro* y *ex vitro*, lo que permitió identificar retos asociados a la desinfección y a las condiciones de cultivo en medios estériles. Además, se analizó el desarrollo inicial de las plántulas e hijuelos de *Kalanchoe daigremoiana*, donde se realizaron ensayos comparativos entre muestra magnetizadas y sus muestras control. Los hallazgos obtenidos refuerzan el potencial del magnetopriming como herramienta viable para mejorar la germinación, el vigor y el desarrollo inicial de plántulas, especialmente en condiciones propensas a estrés o contaminación.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento agrícola enfrenta desafíos significativos debido al cambio climático, la degradación del suelo y la necesidad de optimizar la producción en condiciones adversas. En este contexto, han surgido alternativas sostenibles para mejorar la germinación y el desarrollo de las plantas desde sus etapas iniciales. Una de estas técnicas emergentes es el magnetopriming, un método de pretratamiento físico que expone a las semillas a campos magnéticos estáticos o variables de baja intensidad (Low-intensity Magnetic Fields, LMF) con el fin de inducir respuestas fisiológicas beneficiosas [1, 2].

Diversos estudios han demostrado que el magnetopriming además de su carácter amigable con el medio ambiente puede incrementar la tasa de germinación, el vigor de las plántulas, la absorción de agua, la actividad antioxidante, la eficiencia fotosintética y la tolerancia al estrés abiótico. Estas respuestas han sido atribuidas a la activación de procesos bioquímicos relacionados con la expresión génica, la síntesis de pigmentos fotosintéticos y la mejora en el intercambio gaseoso de las hojas [3, 4, 5, 6].

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del magnetopriming en semillas de *Lycopersicon esculentum* (jitomate saladet), *Echinocactus grusonii y Lens esculenta*, mediante la exposición controlada a campos magnéticos de distinta intensidad y duración. Complementando el

estudio, se buscó estudiar los efectos del LMF en plantas como *Kalanchoe daigremoiana,* en condiciones *in vitro.*

TEORÍA

Desde una perspectiva fisiológica, la exposición de las semillas a campos magnéticos induce cambios bioquímicos y biofísicos que influyen positivamente en múltiples etapas del desarrollo vegetal. Entre los efectos más reportados se encuentran el aumento en la velocidad y porcentaje de germinación, mayor absorción de agua, incremento del contenido de proteínas solubles y mejor desarrollo de las estructuras iniciales de la plántula como la radícula, el hipocótilo y los cotiledones.

Los campos magnéticos también han demostrado potenciar la actividad antioxidante, mejorar la eficiencia del fotosistema II, y aumentar la concentración de pigmentos fotosintéticos como clorofila a, clorofila b y carotenoides. Estos efectos se traducen en una mejor capacidad fotosintética y, por ende, en un crecimiento más vigoroso y tolerante frente a factores de estrés biótico y abiótico.

Estudios previos en *Solanum lycopersicum* han mostrado que intensidades de campo que oscilan entre los 50 y 200 mT, aplicadas durante lapsos que varían entre 1 minuto y 1 hora, pueden generar mejoras significativas en el número de hojas, área foliar, número y peso de frutos, así como en la longitud de raíces y tallos. Sin embargo, los efectos pueden variar dependiendo de la especie, la intensidad del campo aplicado, la duración del tratamiento y las condiciones del entorno.

Esta base teórica sustenta el diseño experimental del presente trabajo, que busca explorar y validar los beneficios del magnetopriming en condiciones controladas y reproducibles. En el caso de *Kalanchoe daigremoiana,* su comportamiento bajo LMF no ha sido ampliamente documentada, por lo cual este estudio busca explorar su respuesta fisiológica inicial a dicha situación.

PARTE EXPERIMENTAL

Para evaluar el efecto del magnetopriming en la germinación de *Lycopersicon esculentum* (jitomate saladet y *Echinocactus grusonii*, se diseñaron diversos ensayos bajo condiciones controladas, utilizando campos magnéticos estáticos de baja intensidad. Las semillas fueron sometidas a tratamientos con diferentes intensidades (50–200 mT) y tiempos de exposición (3, 10 y 15 minutos), utilizando un electroimán.

Preparación del material y condiciones de siembra

- Las semillas se sembraron en cajas Petri estériles con dos capas de papel filtro humedecido con 4 mL de agua destilada.
- Las cajas fueron selladas con cinta para prevenir contaminación y colocadas en condiciones ambientales estables (25 °C aprox.), dentro de un microondas no funcional utilizado como cámara de incubación controlada.
- Se establecieron controles negativos (sin radiación magnética) y réplicas por cada tratamiento.

Tratamiento con campo magnético

- Las semillas se expusieron a un campo magnético generado por un electroimán de flujo variable.
- Se aplicaron tiempos de exposición de 3, 10 y 15 minutos, separados por pausas de descanso entre exposiciones.
- Se registró la intensidad del campo magnético en cada intervalo, observando fluctuaciones en algunos casos.

Seguimiento de germinación y crecimiento

- Se realizaron observaciones a intervalos de 24, 48, 72, 96, 144, 168, 192 y 240 horas.
- Se documentaron variables como:
    - Número de semillas germinadas (radícula visible)
    - Longitud de radículas e hipocótilos
    - Desarrollo de cotiledones y primeras hojas

  - Presencia de contaminación fúngica
- Se calculó el porcentaje de germinación (PG) mediante la fórmula (1):

$$PG = \frac{\textbf{Número de semillas germinadas}}{\textbf{Número total de semillas sembradas}} \textbf{X100} \quad (1)$$

Otras especies evaluadas

También se realizaron ensayos preliminares con *Lens esculenta* (lenteja), siguiendo protocolos adaptados de desinfección, siembra y exposición magnética. Estas pruebas permitieron observar las limitaciones del protocolo en especies con diferentes requerimientos fisiológicos.

Además de *Kalanchoe daigremontiana* donde plántulas e hijuelos fueron expuestos a dos tipos de campos magnéticos constantes, 226mT y 230mT durante 150 días ayudando a la observación del crecimiento tanto en hojas como en las radículas.

RESULTADOS

En los ensayos realizados con *Lycopersicon esculentum*, se observaron diferencias significativas en la germinación y desarrollo de las plántulas entre las muestras magnetizadas y las muestras control.

Porcentaje de germinación (PG):

- En las muestras magnetizadas con campos de 50–200 mT, se registró un PG máximo del 100% (muestra magnetizada 1, 10 min), superando al control (71.42%).
- Otras muestras magnetizadas mostraron PG del 95.23% y 85.71%, mientras que los controles oscilaron entre 71.42% y 57.14%, dependiendo del tiempo de exposición.

Tabla 1. Resultados de muestras a las 192 horas después la de siembra con Jitomate Saladet “Lycopersicon esculentum”.

192 hrs.		
Muestra control.	Muestra magnetizada 10 min.	Muestra magnetizada 15 min.
5 semillas germinadas, 2 con radículas y 3 con raíces pronunciadas, hipocótilo y cotiledón.	7 semillas germinadas, 2 con radícula y 5 con raíces primarias y secundarias e hipocótilos visibles.	4 semillas germinadas con raíces pronunciadas, raíces secundarias e hipocótilos visibles.

Tabla 2. Porcentaje de germinación (PG) 192 horas después de ser sembradas.

Muestra	*Porcentaje de germinación (PG)*	
Muestra control.	90.47%	72.56%
Muestra magnetizada 10 min.	92.47%	85.71%
Muestra magnetizada 15 min.	-	57.14%

Velocidad de germinación:

- Las semillas magnetizadas presentaron una mayor sincronía en la emergencia de radículas, aunque en algunos casos tardaron más horas en germinar que los controles (ej. 72 hrs vs. 48 hrs).
- A las 168 horas, las muestras magnetizadas mostraron un desarrollo más avanzado en raíces secundarias e hipocótilos en comparación con los controles.
- Resistencia a contaminación:
- Las muestras magnetizadas presentaron una menor incidencia de contaminación por hongos (Aspergillus spp.) en comparación con los controles, donde se observó crecimiento de hifas y esporas.

Desarrollo morfológico:

- Las plántulas magnetizadas exhibieron raíces más largas y mayor formación de hojas cotiledonares en etapas tempranas (144–192 hrs).
- En algunos casos, las muestras control superaron en número de plántulas germinadas, pero con mayor variabilidad en su desarrollo.
- Resultados en *Echinocactus grusonii* y *Lens culinaris*:
- En *Echinocactus grusonii*, los protocolos de desinfección in vitro no fueron suficientes, resultando en una tasa de contaminación del 100% en las muestras.
- Las pruebas con *Lens culinaris* no mostraron germinación debido a problemas de oxigenación en el diseño experimental.

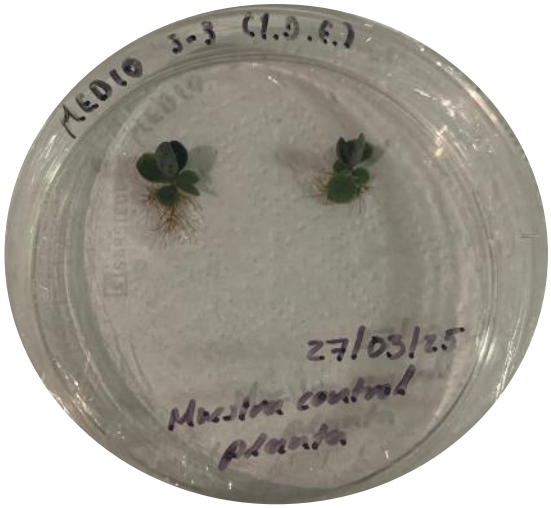
Resultados en *Echinocactus grusonii* y *Lens culinaris*:

- En *Echinocactus grusonii*, los protocolos de desinfección in vitro no fueron suficientes, resultando en una tasa de contaminación del 100% en las muestras.
- Las pruebas con *Lens culinaris* no mostraron germinación debido a problemas de oxigenación en el diseño experimental.

Resultados en *Kalanchoe daigremontiana*:

- *Kalanchoe daigremontiana* mostró una respuesta sumamente positiva a lamagnetizacion durante 150 días en medio MS y con luz y temperaturas controladas, se observó que hubo un aumento significativo en las plántulas e hijuelos magnetizados, las hojas y las radículas estaban mucho más grandes y maduras, incluso en las muestras magnetizadas ya era posible ver las hojas dentadas que son la muestra de una planta llegando a su fase reproductiva.

Tabla 3. Comparación entre muestras magnetizadas y no magnetizadas de

Muestra control	Muestra magnetizada
DÍA 1 (27/03/2025)	
Figura 1. Muestra control de *Kalanchoe daigremontiana* al día 1 en medio MS	Figura 2. Muestra magnetizada de *Kalanchoe daigremontiana* al día 1 en medio MS
DÍA 50 (15 de mayo de 2025)	
 Figura 3. Muestra control de *Kalanchoe daigremontiana* al día 50 en medio MS	Figura 4. Muestra magnetizada de *Kalanchoe daigremontiana* al día 50 en medio MS

CONCLUSIONES

Efecto positivo del magnetopriming:

- La exposición a campos magnéticos de baja intensidad (50–200 mT) mejora significativamente el porcentaje de germinación en *Lycopersicon esculentum*, alcanzando hasta un 100% en condiciones óptimas.
- Además, se observó un efecto protector contra contaminantes fúngicos, lo que sugiere que el magnetopriming podría reducir la dependencia de fungicidas químicos.

Dependencia de parámetros:

- Los resultados varían según la intensidad, el tiempo de exposición y las condiciones de siembra. Por ejemplo, exposiciones prolongadas (15 min) no siempre fueron más efectivas que tratamientos cortos (10 min).
- La homogeneidad del campo magnético es crítica, ya que fluctuaciones durante la exposición (ej. 20–70 mT) pueden afectar la reproducibilidad.

Limitaciones y mejoras:

- En *Echinocactus grusonii*, se requiere optimizar los protocolos de desinfección (mayor concentración de cloro o escarificación con ácido sulfúrico).
- Para *Lens culinaris*, es necesario rediseñar el sistema de siembra para garantizar oxigenación y humedad adecuadas.

Aplicaciones futuras:

- El magnetopriming se confirma como una técnica sostenible y de bajo costo para mejorar la germinación en cultivos hortícolas.
- Se recomienda ampliar los estudios a otras especies y condiciones de estrés (salinidad, sequía) para evaluar su potencial en agricultura resiliente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sari, M. E., DemıR, İ., Yildirim, K., & MemıŞ, N. (2023). Magnetopriming enhance germination and seedling growth parameters of onion and lettuce seeds. International Journal Of Agriculture, Environment And Food Sciences, 7(3), 468-475. https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1
2. G. Chirico, C. D'Elia, N. D'Ambrosio y R. Massa, "Diseño y evaluación de un aplicador para tratamientos de magnetocebado", en IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, vol. 7, no. 3, pp. 245-250, septiembre de 2023, doi: 10.1109/JERM.2023.3267659
3. Banerjee, A., & Roychoudhury, A. (2022). Role of magnetopriming in alleviation of abiotic stress in plants. En Elsevier eBooks (pp. 519-523). https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85665-2.00018-2
4. Sarraf, M., Deamici, K. M., Taimourya, H., Islam, M., Kataria, S., Raipuria, R. K., Abdi, G., & Brestic, M. (2021). Effect of Magnetopriming on Photosynthetic Performance of Plants. International Journal Of Molecular Sciences, 22(17), 9353. https://doi.org/10.3390/ijms22179353
5. Abhary, Mohammad & Akhkha, Abdellah. (2023). Effects of neodymium magneto-priming on seed germination and salinity tolerance in tomato. Bioelectromagnetics. doi: 44. 10.1002/bem.22438.
6. Sharma, A., Rathore, S., Srinivasan, K., & Tyagi, R. (2014). Comparison of various seed priming methods for seed germination, seedling vigour and fruit yield in okra (Abelmoschus esculentus L. Moench). Scientia Horticulturae, 165, 75-81. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.044
7. Gupta MK, Anand A., Paul V., Dahuja A., Singh A. Mejora del vigor de las semillas de tomate cherry preparadas con magnetoactivación estática y pulsada mediada por especies reactivas de oxígeno. Indian J. Plant Physiol. 2015;20:197–204. doi: 10.1007/s40502-015-0161-8.
8. Ball Chile. (2021). Tomato Micro-T [PDF]. https://www.ballchile.cl/wp content/uploads/2021/08/Tomato_Micro_T.pdf
9. Martínez-Carbonell, A. (s.f.). Germination of tomato seeds [Lycopersicon esculentum L.] under salt stress. Semantic Scholar. https://www.semanticscholar.org/paper/Germination-of-tomato-seeds-%5BLycopersicon L.%5D-under-Martinez-

Carbonell/2fd737f2bca7edb9ae4b8cd402f89ed891dfdcddhttps://www.semanticscholar.org/paper/Germination-of-tomato-seeds-%5BLycopersicon-L.%5D-under-Martinez-Carbonell/2fd737f2bca7edb9ae4b8cd402f89ed891dfdcdd

10. International Agrophysics. (2009). Seed germination under different soil moisture levels. http://www.old.international-agrophysics.org/artykuly/international_agrophysics/IntAgr_2009_23_1_44.pdf
11. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1980). Hojas divulgadoras: Tomate para industria. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1980_10.pdf
12. Gobierno de México. (2023). Monografía de la lenteja. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/874028/Lenteja_monografi_a_2023.pdf

EFECTO DE LA DIGESTIÓN *IN VITRO* EN LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE BEBIDAS A BASE DE JUGO DE GRANADA, PROTEÍNAS DE SUERO DE LECHE Y AMARANTO

Orlando Arellano-Castillo[1], Marlenne Yadari Lima-Silva[2,3], Stephany Alvarado-Velásquez[2,3], Rubí Viveros-Contreras[1], Enrique Meza-Alvarado[1], Armando J. Martínez[4] y Elvia Cruz Huerta[2]

[1]Centro de Investigaciones Biomédicas, Universidad Veracruzana, Veracruz, México
[2]Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Veracruz, México
[3]Facultad de Nutrición - Campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Veracruz, México
[4]Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana, Veracruz, México
orlandoarca94@gmail.com

RESUMEN

El jugo de granada tiene alto contenido de compuestos fenólicos, los cuales se han asociado con múltiples efectos benéficos para la salud. Estos compuestos pueden interactuar con diversos nutrientes, incluidas las proteínas, modificando su solubilidad, digestibilidad, biodisponibilidad y actividad biológica. Interacciones que dependen de factores como la estructura de la proteína, el tipo y la proporción de fenoles, así como de la temperatura y el pH. Durante la digestión, se forman complejos que protegen a los compuestos fenólicos de la degradación, mejorando su estabilidad y permitiendo una liberación gradual en el intestino, lo que favorece su absorción. Por otra parte, la proteína de suero de leche destaca por su elevado contenido de aminoácidos esenciales y alta digestibilidad, mientras que la proteína de amaranto se caracteriza por tener un perfil de aminoácidos completo y un importante contenido de lisina, un aminoácido esencial. Estas propiedades permiten que ambas proteínas sean opciones prometedoras para la formación de complejos con fenoles. El estudio evaluó la actividad antioxidante de dos bebidas formuladas a partir de jugo de granada (JG) y concentrado proteico, utilizando como fuentes proteicas suero de leche (JG:WPC) y amaranto (JG:APC). Ambas formulaciones fueron estandarizadas a una concentración de 54 mg de proteína por mililitro, conforme a los criterios establecidos por la FDA para productos con alto contenido proteico. La digestión in vitro se realizó siguiendo el protocolo armonizado INFOGEST. El contenido fenólico total se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu, y el contenido de antocianinas monoméricas por el método del pH diferencial. La capacidad antioxidante de los digeridos fue determinada mediante los ensayos de inhibición de radicales DPPH y ABTS. Los digeridos gástrico e intestinal de JG:WPC presentaron el mayor contenido fenólico, con valores de 9.40 ± 0.31 y 10.08 ± 0.32 mg EAG g^{-1}, respectivamente. El contenido de antocianinas monoméricas en ambas bebidas enriquecidas con proteína mostraron una mayor concentración en las fases gástrica e intestinal en comparación con el jugo de granada (JG). Concretamente, JG:APC presentó valores de 0.13 ± 0.01 y 0.26 ± 0.01 mg C3G g^{-1}, mientras que JG:WPC presentó valores de 0.14 ± 0.03 y 0.45 ± 0.01 mg C3G g^{-1} en las mismas fases. Respecto a la actividad antioxidante, en el ensayo DPPH, el JG mostró la mayor actividad, con valores de IC_{50} de 1381.19 ± 48.90 y 1312.89 ± 46.99 µg mL^{-1} en los digeridos gástrico e intestinal respectivamente, seguido por JG:WPC, con IC_{50} de 1242.40 ± 10.24 y 1079.17 ± 14.70 µg mL^{-1} respectivamente. En el ensayo ABTS, la formulación JG:WPC exhibió la mayor actividad antioxidante tras la digestión intestinal, con IC_{50} de 642.33 ± 19.19 µg·mL^{-1}, seguida del digerido intestinal de JG:APC, con un IC_{50} de 846.93 ± 44.32 µg·mL^{-1}. Los resultados muestran el potencial de las interacciones entre proteínas y compuestos fenólicos para mejorar la estabilidad y bioaccesibilidad de metabolitos con actividad antioxidante durante la digestión. Además, evidencian nuevas oportunidades para el desarrollo de alimentos funcionales y nutracéuticos dirigidos a la promoción de la salud.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el mercado global de bebidas ha evidenciado una marcada tendencia hacia productos funcionales y orientados al bienestar, impulsada por consumidores conscientes de su salud, creando una demanda de bebidas que sean naturales y que ofrezcan beneficios específicos, como el contenido proteico y las propiedades antioxidantes (Sloan, 2025). En este contexto, las bebidas funcionales, en particular las de origen lácteo, incrementaron en protagonismo como vehículos para incorporar diversos compuestos bioactivos (Dini, 2019).

El jugo de granada es un alimento con una elevada concentración de compuestos fenólicos, como ácidos fenólicos, flavonoides y taninos hidrolizables (Hegazi et al., 2021). Estos han sido vinculados ampliamente con diversas propiedades benéficas para la salud, tales como efectos antioxidantes, antimicrobianos, antiinflamatorios, cardioprotectores y antidiabéticos (Bonesi et al., 2019). Funciones que están asociadas a la capacidad de los antioxidantes para contrarrestar las especies reactivas de oxígeno (ROS), cuya acumulación excesiva en el organismo conduce al estrés oxidativo, proceso relaciona con la aparición y progresión de múltiples enfermedades crónicas, incluyendo la diabetes, el cáncer, trastornos cardiovasculares, neurodegenerativos e inflamatorios (Chandimali et al., 2025; Gulcin, 2020).

Al respecto, la eficacia de los compuestos fenólicos depende en gran medida por su biodisponibilidad, la cual puede verse comprometida durante la digestión debido a los factores fisicoquímicos como el pH, la actividad enzimática y la interacción con otros nutrientes que pueden degradar o transformar a los polifenoles, modificando su estructura, estabilidad y su capacidad antioxidante (Qin et al., 2022; Ray & Mukherjee, 2021).

En este sentido, las proteínas alimentarias aportan diversos beneficios, por un lado, aportan péptidos bioactivos con propiedades antioxidantes y diversas actividades biológicas (Peighambardoust et al., 2021), y por otro, pueden formar complejos con polifenoles desempeñando un papel protector (Feng et al., 2023). Particularmente, las proteínas de suero de leche presentan alta digestibilidad y un perfil de aminoácidos completo (Yiğit et al., 2023), mientras que la proteína de amaranto ofrece una composición equilibrada de aminoácidos, principalmente en algunos esenciales como la lisina, metionina, isoleucina, triptófano y treonina (Rivero Meza et al., 2023). Además, la interacción proteína-fenol no solo puede mejorar la estabilidad y biodisponibilidad de los compuestos fenólicos, sino también modificar las propiedades funcionales y digestibilidad de las proteínas involucradas (Günal-Köroğlu et al., 2023; Li et al., 2021).

Por lo tanto, el estudio del efecto de la digestión *in vitro* sobre la actividad antioxidante de bebidas elaboradas con jugo de granada, proteínas de suero de leche y amaranto resulta importante para comprender el la tendencia de estos compuestos bajo condiciones fisiológicas simuladas, permitiendo anticipar el impacto de las interacciones en la eficacia antioxidante y aportar evidencia para la formulación de alimentos funcionales dirigidos a la·prevención de enfermedades crónicas relacionas con el estrés oxidativo.

TEORÍA

En los últimos años, las bebidas funcionales han adquirido gran relevancia, especialmente aquellas de origen lácteo, ya que han sido empleadas como vehículos eficaces para incorporar componentes bioactivos como probióticos, prebióticos, vitaminas, minerales, antioxidantes, entre otros compuestos bioactivos (Dini, 2019).

Entre los compuestos bioactivos de mayor interés se encuentran los compuestos fenólicos, metabolitos secundarios presentes en diversos tejidos vegetales. Estos se caracterizan por tener uno o más grupos hidroxilo unidos a un anillo aromático, y pueden encontrarse en forma libre o conjugada mediante enlaces con residuos de azúcares, lo que influye en su actividad biológica, especialmente en su capacidad de eliminación de radicales libres y a la modulación del estrés oxidativo (Zhang et al., 2022).

Por otro lado, las antocianinas son pigmentos pertenecientes al grupo de los flavonoides, estas se encuentran en forma de glicósido, es decir, su estructura es una aglicona llamada antocianidina y un residuo de carbohidrato (Enaru et al., 2021). Estos compuestos tienen una capacidad antioxidante notable debido a su estructura de catión flavilio con múltiples grupos hidroxilo, la que les permite neutralizar especies reactivas de oxígeno mediante mecanismos de transferencia de electrones y de átomos de hidrógeno (Mattioli et al., 2020).

Entre las matrices alimentarias que han avivado mayor interés se encuentra el jugo de granada, por su riqueza en compuestos fenólicos, entre los que se destacan los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos hidrolizables (Hegazi et al., 2021). Estos metabolitos han sido asociados con diversos efectos benéficos para la salud, tales como propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias, anticarcinogénicas, cardioprotectoras y antidiabéticas (Bonesi et al., 2019). Asimismo, las proteínas alimentarias son moléculas que han demostrado un papel importante en la prevención y el manejo de diversas enfermedades (Peighambardoust et al., 2021).

Dentro de las proteínas alimentarias, destacan las proteínas de suero de leche, que representan aproximadamente el 20% del contenido proteico total de la leche. Estas proteínas tienen un perfil completo de aminoácidos, alta digestibilidad y desempeña diversas funciones biológicas, como actividad antioxidante, antinflamatoria, antiobesogénica, antihipertensiva, antidiabética y supresora del apetito (Yiğit et al., 2023). La actividad de las proteínas de suero de leche ocurre a través de mecanismos como la capacidad de eliminar radicales libres, inhibir la peroxidación lipídica y quelar iones metálicos y está relacionada principalmente a la presencia de péptidos bioactivos y aminoácidos azufrados, como la cisteína (Mehra et al., 2021; Stobiecka et al., 2022).

De igual forma, la proteína de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.), compuesta mayoritariamente por albúminas y globulinas (Constantino & Garcia-Rojas, 2022), ha generado relevancia debido a que tiene una composición equilibrada de aminoácidos, destacando aquellos esenciales como la lisina, metionina, isoleucina, triptófano, y treonina. Además, se han identificado diversos péptidos de esta proteína con funciones biológicas como antioxidantes, antihipertensivos, antiinflamatorio y antimicrobiano (Rivero Meza et al., 2023).

Un aspecto de gran interés actualmente es la capacidad de los compuestos fenólicos de formar interacciones con macronutrientes, particularmente con proteínas, con las que tienden a formar complejos mediante enlaces covalentes y no covalentes (Ribas-Agustí et al., 2018). Estas interacciones están moduladas por diversos factores, como la estructura de la proteína, la naturaleza y concentración de los compuestos fenólicos, así como por las condiciones fisicoquímicas del entorno, incluyendo el pH y la temperatura (Zhang et al., 2021). Además, la formación de complejos proteína-fenol puede proteger a los compuestos fenólicos de la degradación enzimática y oxidativa durante la digestión, favoreciendo su estabilidad estructural y regulando su liberación en el intestino, mejorando su bioaccesibilidad y biodisponibilidad (Li et al., 2021). A su vez, las proteínas que participan en estas interacciones pueden modificar sus propiedades funcionales y su digestibilidad debido a los cambios estructurales inducidos (Günal-Köroğlu et al., 2023).

Los efectos sobre los compuestos fenólicos y las antocianinas monoméricas de los complejos son importantes, puesto que la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos suele ser baja de entre 5 y 10% (Ray & Mukherjee, 2021), y en el caso de las antocianinas, estos compuestos son susceptibles a la degradación por diferentes factores, como el pH, la temperatura, la presencia de oxígeno y la luz (Enaru et al., 2021).

PARTE EXPERIMENTAL

Formulación

Las bebidas elaboradas a base de jugo de granada, concentrado de proteína de suero de leche (WPC) y concentrado de proteína de amaranto (APC) fueron formuladas de acuerdo con los

requerimientos de la FDA para alimentos con alto contenido proteico, incorporando 54 mg de proteína por mililitro de jugo (Rios-Villa et al., 2020).

Digestión gastrointestinal *in vitro*

Las bebidas fueron sometidas a un proceso de digestión gastrointestinal *in vitro* siguiendo el protocolo armonizado INFOGEST, que incluye las fases oral, gástrica e intestinal (Brodkorb et al., 2019). Todos los reactivos y enzimas fueron adquiridos de Sigma-Aldrich, de acuerdo con las recomendaciones del protocolo (Figura 1).

Fase oral. Las bebidas se mezclaron en proporción 1:1 (p/v) con fluido salival simulado (SSF), ajustando el pH a 7 con NaOH. Se incorporó α-amilasa salival humana a una concentración de 75 U/mL, posteriormente se incubó a 37 °C con agitación a 150 rpm durante 2 minutos.

Fase gástrica. Al finalizar la fase oral, el contenido se mezcló en proporción 1:1 (v/v) con fluido gástrico simulado (SGF) y se ajustó a pH 3 con HCl. Se adicionó pepsina y la mezcla se incubó a 37 °C con agitación constante a 150 rpm durante 120 minutos. Se extrajo una alícuota y se inactivó la acción de la pepsina ajustando el pH a 8 con NaOH.

Fase intestinal. El contenido procedente de la fase gástrica se mezcló en proporción 1:1 (v/v) con fluido intestinal simulado (SIF), se ajustó a pH 7 con NaOH y se añadieron pancreatina y sales biliares porcina, y se incubó a 37 °C con agitación a 150 rpm durante 120 minutos. La actividad enzimática se detuvo utilizando Pefabloc® SC.

Tras la digestión, las muestras se centrifugaron a 16,000 x *g* a 4 °C durante 10 minutos para separar las fracciones solubles e insolubles. Los digeridos se almacenaron a -80 °C hasta su análisis.

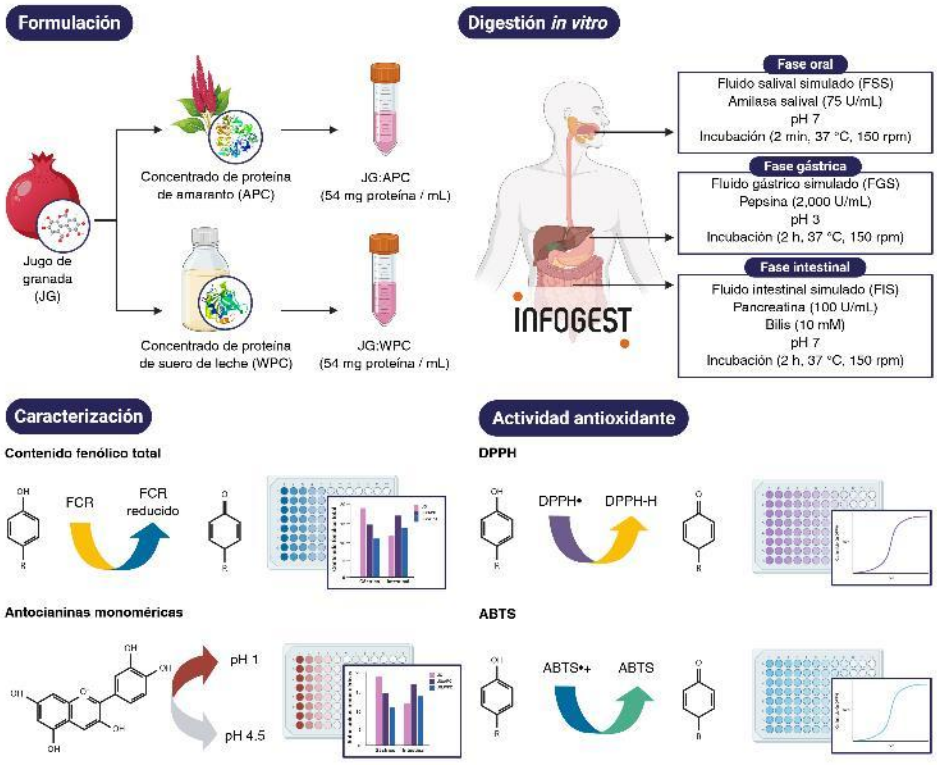


Fig. 1 Esquema representativo del proceso de formulación, digestión gastrointestinal in vitro y evaluación de la actividad antioxidante de bebidas a base de jugo de granada enriquecidas con

concentrado de proteína de amaranto o suero de leche. Creada en BioRender. Arellano, O. (2025) https://BioRender.com/vqjuplk

Cuantificación de compuestos fenólicos totales

La cuantificación del contenido fenólico total se efectuó mediante el método de Folin-Ciocalteu, siguiendo el protocolo descrito por Moreno-García et al. (2022). Se preparó una curva estándar a partir de una solución stock de ácido gálico a 500 ppm en agua destilada. En una placa de 96 pocillos, se agregaron 20 µL de la muestra en diferentes concentraciones, seguido de la adición de 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (1N) y se dejó reposar por 5 minutos. Posteriormente, se añadieron 80 µL de una solución de carbonato de sodio al 7.5% y se incubó a 37 °C durante 1 hora y 30 minutos. Finalmente, la absorbancia se midió a una longitud de onda de 765 nm en un espectrofotómetro de microplacas. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg EAG g^{-1}).

Cuantificación de antocianinas monoméricas

La cuantificación de antocianinas monoméricas se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita por Lee et al. (2005) basada en una técnica de pH diferencial. Previamente, se prepararon dos buffers, una solución de KCl (0.025 M, pH 1) y una solución de acetato de sodio (0.4 M, pH 4.5). La determinación se realizó en una placa de 96 pocillos, se utilizaron 60 µL de la muestra, se diluyeron con 240 µL de buffer correspondiente (pH 1 o pH 4.5). La placa se incubó a 25 °C por 15 minutos en oscuridad y se realizó la lectura a longitudes de onda de 520 y 700 nm en un espectrofotómetro de microplacas. El contenido de antocianinas monoméricas se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

Ec. 1 $$\boldsymbol{Antocianinas\ mon\acute{o}mericas} =$$

Donde A es (A_{520nm} – A_{700nm}) pH 1 – (A_{520nm} – A_{700nm}) pH 4.5, PM es el peso molecular cianidina-3-glucósido (449.2 g/mol), FD es el factor de dilución, ε es el coeficiente de extinción molar (26 900 L x mol^{-1} x cm^{-1}), L es la longitud del trayecto óptico en cm. Los resultados fueron expresados como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido por gramo (mg Eq C3G g^{-1}).

Determinación de actividad antioxidante

DPPH

La capacidad antioxidante basada en la eliminación de los radicales 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH) se evaluó según el método descrito por Brand-Williams et al. (1995), modificado para su aplicación en microplaca de 96 pocillos. Se preparó una curva estándar de Trolox, con una concentración máxima de 800 µM en metanol al 80%. Posteriormente, se preparó una solución del radical DPPH (100 µmolar) en metanol al 80% en un recipiente protegido contra la luz. El ensayo se realizó en una microplaca de 96 pocillos donde se agregaron 150 µL de la muestra en a diferentes concentraciones y 150 µL de la solución del radical DPPH. Se incubó a temperatura ambiente por 30 minutos y posteriormente se midió la absorbancia a una longitud de onda de 517 nm en un espectrofotómetro de microplacas. El porcentaje de inhibición del radical DPPH se calculó mediante la siguiente ecuación:

Ec. 2 $$\boldsymbol{Inhibici\acute{o}n\ radical\ DPPH} = \boldsymbol{x100}$$

Donde A_1 corresponde a la absorbancia de la solución de DPPH en ausencia de la muestra, y A_2 a la absorbancia en presencia de la muestra. El valor de IC_{50} se determinó graficando el porcentaje de inhibición del radical DPPH (eje y) en función de las concentraciones de la muestra (eje x), mediante el ajuste de una curva dosis-respuesta con modelos de regresión no lineal. Los resultados se expresaron en microgramos del digerido por mililitro (µg mL^{-1}).

ABTS

La capacidad antioxidante por el ensayo del ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS) se realizó según el método descrito por Re et al. (1999) adaptado para microplaca de 96 pocillos. Se preparó una curva estándar de Trolox con una concentración máxima de 800 µM. El radical monocatión $ABTS^{\cdot+}$ se generó tras disolver el reactivo ABTS en una solución de persulfato de potasio (2.45 mM) hasta alcanzar una concentración final de 7 mM y se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente durante 12 horas antes de su uso. Posteriormente, la solución se diluyó con PBS hasta obtener una absorbancia de entre 0.650-0.750 a 734 nm. La determinación de la actividad antioxidante se realizó en una placa de 96 pocillos, se agregaron 10 µL de la muestra a diferentes concentraciones y 190 µL de la solución del radical $ABTS^{\cdot+}$, y se dejó reaccionar durante 6 minutos. La absorbancia se midió a 734 nm en un lector de microplacas. El porcentaje de inhibición del radical $ABTS^{\cdot+}$ se calculó mediante la siguiente ecuación:

Ec. 3 $$\boldsymbol{Inhibición\ radical\ ABTS}\ (\%) = \boldsymbol{x100}$$

Donde A_1 corresponde a la absorbancia de la solución de $ABTS^{\cdot+}$ en ausencia de la muestra, y A_2 a la absorbancia en presencia de la muestra. El valor de IC_{50} se determinó graficando el porcentaje de inhibición del radical ABTS (eje y) en función de las concentraciones de la muestra (eje x), mediante el ajuste de una curva dosis-respuesta con modelos de regresión no lineal. Los resultados se expresaron en microgramos del digerido por mililitro (µg mL^{-1}).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Graphpad Prism 9. Se aplicó un ANOVA de dos vías y se realizaron las comparaciones múltiples de Tukey para identificar diferencias entre medias, considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$. Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza requeridos para la validez de la prueba. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar.

RESULTADOS

En la Figura 2 se presentan los valores del contenido fenólico total (CFT) y de antocianinas monoméricas (CAM) en los digeridos gástrico e intestinal del jugo de granada, así como de las bebidas conformadas por jugo de granada y proteínas de suero de leche (JG:WPC) o de amaranto (APC). Las variaciones observadas en el CFT y CAM a lo largo del proceso digestivo podrían atribuirse a la formación de complejos proteína-fenol. Estos complejos suelen ser más estables durante los procesos digestivos, protegiendo a los fenoles de la degradación enzimática y oxidativa, y regulando su liberación en el tracto gastrointestinal (Li et al., 2021).

Entre las muestras analizadas, la bebida JG:WPC presentó los valores más altos de CFT y CAM en ambas fases digestivas. Esta tendencia podría estar relacionada con el efecto protector de las proteínas del suero de leche al formarse complejos, favoreciendo una menor degradación y una liberación gradual de estos metabolitos durante la digestión. Resultados similares han sido descritos por de Morais et al. (2020) en complejos formados de aislado de proteína de suero de leche (WPI) y ácido cafeico o epigalocatequina (EGCG).

La capacidad de estas proteínas para formar complejos proteína-fenol se asocia con su naturaleza globular y con el pH ácido tanto del jugo de granada como de la fase gástrica de la digestión. Estas condiciones favorecen la inducción de cambios conformacionales en las proteínas, favoreciendo la exposición de sus sitios de unión en ambientes ácidos, como lo señala Ren et al. (2021).

En el caso de la bebida compuesta por jugo de granada y proteína de amaranto (JG:APC), se observó una menor degradación del CAM en comparación con el jugo de granada solo, mientras que esta diferencia no se presentó en el CFT. Esto sugiere que la proteína de amaranto (APC) podría

tener una mayor afinidad por las antocianinas. Ambas bebidas mostraron una menor degradación de antocianinas, lo que indica una posible interacción con las proteínas, que podría estar mediada por el perfil de aminoácidos de cada proteína y el número de sitios de unión disponibles. Esta respuesta concuerda con lo descrito por Wu et al. (2023), quienes señalan que las antocianinas presentan alta afinidad con las proteínas, principalmente con las ricas en prolina.

Otro factor determinante en la liberación de compuestos fenólicos desde los complejos proteína-fenol, es la digestibilidad de las proteínas. Günal-Köroğlu et al. (2023) señalan que la formación de estos complejos puede reducir la digestibilidad proteica e influir en la liberación de polifenoles. En este sentido, las diferencias observadas en el CFT y CAM de las bebidas podrían explicarse por la mayor digestibilidad del WPC (86.71%) en comparación con la proteína de amaranto (79.19%), como lo reportan Wang et al. (2022) y Serena-Romero et al. (2023), respectivamente. Esto indica que la menor digestibilidad del APC limita la liberación de CFT y CAM durante el proceso digestivo respecto al WPC.

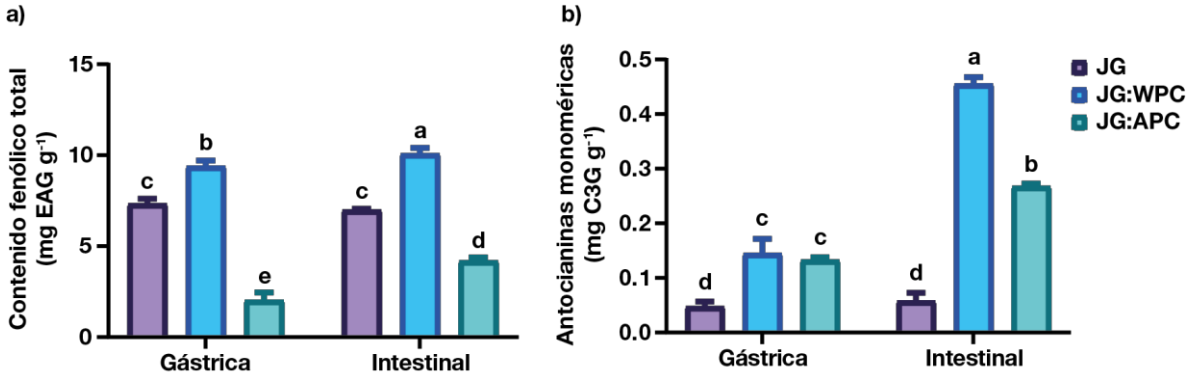


Fig. 2 Efecto de la digestión gastrointestinal *in vitro* sobre **a)** contenido fenólico total y **b)** antocianinas monoméricas. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 4). Los datos fueron analizados mediante un ANOVA de dos vías y comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$). Letras distintas indican diferencias significativas.

De acuerdo con Feng et al. (2023), los cambios debidos a la protección y la regulación de la liberación de compuestos fenólicos y antocianinas monoméricas provista por las proteínas durante la digestión podrían influir directamente en su actividad antioxidante, debido a la capacidad para neutralizar radicales libres de estos metabolitos.

En la Figura 3a se presentan los resultados del ensayo de la actividad antioxidante mediante DPPH. La bebida JG:WPC presentó una actividad comparable a la del jugo de granada, mientras que la bebida JG:APC mostró una disminución durante la digestión. En contraste, la Figura 3b muestra los resultados del ensayo ABTS, en el cual JG:WPC exhibió la mayor actividad antioxidante, mientras que JG y JG:APC presentaron niveles similares entre sí. La diferencia entre la actividad antioxidante de ambas bebidas podría deberse a la eficacia en la protección y liberación de los compuestos fenólicos durante la digestión de los complejos proteína-fenol, como lo menciona Feng et al. (2023).

Además, es importante mencionar que los ensayos DPPH y ABTS aunque ambos se basan en mecanismos de transferencia de un electrón (SET) y abstracción de átomos de hidrógeno (HAT), responden a diferentes tipos de polifenoles (Platzer et al., 2021). En particular, las antocianinas, por su naturaleza polar, tener múltiples grupos hidroxilo, presentarse de manera glucosilada y en medios acuosos, suelen responder mejor al ensayo ABTS, en comparación con el ensayo DPPH (Platzer et al., 2021; Xue et al., 2024).

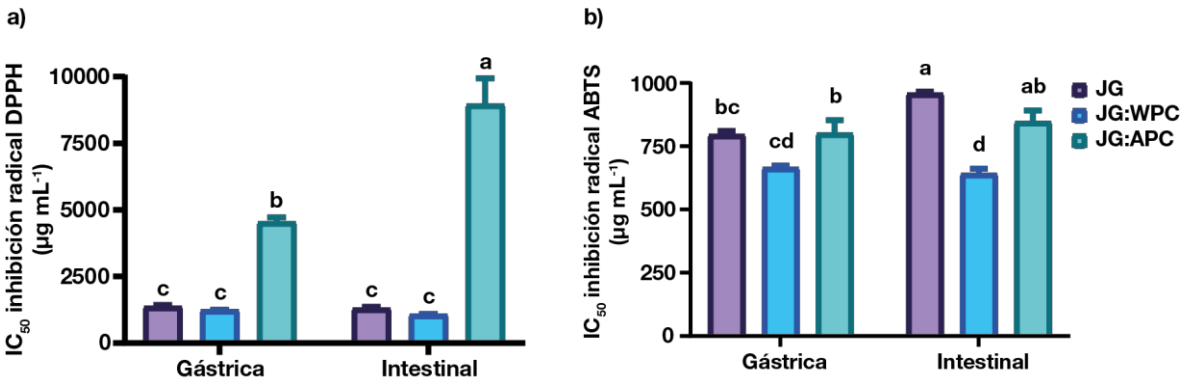


Fig. 3 Efecto de la digestión gastrointestinal *in vitro* sobre la actividad antioxidante por el ensayo a) DPPH y b) ABTS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 4). Los datos fueron analizados mediante un ANOVA de dos vías y comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$). Letras distintas indican diferencias significativas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos destacan que la incorporación de proteínas en bebidas a base de jugo de granada influye en su estabilidad, la liberación de compuestos fenólicos y antocianinas, y la actividad antioxidante durante la digestión. En general, las proteínas actúan como agentes protectores frente a la degradación de estos metabolitos, permitiendo la regulación de su liberación a lo largo del tracto gastrointestinal. Ambas bebidas mostraron cambios en el contenido fenólico total y de antocianinas monoméricas, denotando mayor eficacia de las proteínas del suero de leche para la protección y liberación de estos metabolitos, posiblemente relacionados con su estructura, afinidad y digestibilidad proteica. Estos factores favorecen en la formación de complejos estables y funcionales, con un impacto directo en la bioaccesibilidad y el efecto antioxidante de los compuestos bioactivos. Lo que sugiere el potencial de los complejos proteína-fenol para el desarrollo de bebidas y alimentos funcionales y nutracéuticos que beneficien a la salud a través de su efecto antioxidante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bonesi, M., Tundis, R., Sicari, V., & Loizzo, M. R. (2019). The Juice of Pomegranate (Punica granatum L.): Recent Studies on Its Bioactivities. In Quality Control in the Beverage Industry (pp. 459–489). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816681-9.00013-8
2. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology, 28(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5
3. Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., … Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. Nature Protocols, 14(4), 991–1014. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1
4. Chandimali, N., Bak, S. G., Park, E. H., Lim, H. J., Won, Y. S., Kim, E. K., Park, S. I., & Lee, S. J. (2025). Free radicals and their impact on health and antioxidant defenses: a review. Cell Death Discovery 2025 11:1, 11(1), 1–17. https://doi.org/10.1038/s41420-024-02278-8
5. Constantino, A. B. T., & Garcia-Rojas, E. E. (2022). Proteins from pseudocereal seeds: solubility, extraction, and modifications of the physicochemical and techno-functional properties. Journal of the Science of Food and Agriculture, 102(7), 2630–2639. https://doi.org/10.1002/jsfa.11750
6. de Morais, F. P. R., Pessato, T. B., Rodrigues, E., Peixoto Mallmann, L., Mariutti, L. R. B., & Netto, F. M. (2020). Whey protein and phenolic compound complexation: Effects on antioxidant capacity before and after in vitro digestion. Food Research International, 133, 109104. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109104

7. Dini, I. (2019). An Overview of Functional Beverages. Functional and Medicinal Beverages: Volume 11: The Science of Beverages, 1–40. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816397-9.00001-7
8. Enaru, B., Drețcanu, G., Pop, T. D., Stănilă, A., & Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation. Antioxidants 2021, Vol. 10, Page 1967, 10(12), 1967. https://doi.org/10.3390/ANTIOX10121967
9. Feng, Y., Jin, C., Lv, S., Zhang, H., Ren, F., & Wang, J. (2023). Molecular Mechanisms and Applications of Polyphenol-Protein Complexes with Antioxidant Properties: A Review. Antioxidants, 12(8), 1577. https://doi.org/10.3390/ANTIOX12081577
10. Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. Archives of Toxicology 2020 94:3, 94(3), 651–715. https://doi.org/10.1007/S00204-020-02689-3
11. Günal-Köroğlu, D., Lorenzo, J. M., & Capanoglu, E. (2023). Plant-Based Protein-Phenolic Interactions: Effect on different matrices and in vitro gastrointestinal digestion. Food Research International, 173, 113269. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113269
12. Hegazi, N. M., El-Shamy, S., Fahmy, H., & Farag, M. A. (2021). Pomegranate juice as a super-food: A comprehensive review of its extraction, analysis, and quality assessment approaches. Journal of Food Composition and Analysis, 97, 103773. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103773
13. Lee, J., Durst, R. W., Wrolstad, R. E., Eisele, T., Giusti, M. M., Hach�, J., Hofsommer, H., Koswig, S., Krueger, D. A., Kupina;, S., Martin, S. K., Martinsen, B. K., Miller, T. C., Paquette, F., Ryabkova, A., Skrede, G., Trenn, U., & Wightman, J. D. (2005). Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study. Journal of AOAC INTERNATIONAL, 88(5), 1269–1278. https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269
14. Li, Y., He, D., Li, B., Lund, M. N., Xing, Y., Wang, Y., Li, F., Cao, X., Liu, Y., Chen, X., Yu, J., Zhu, J., Zhang, M., Wang, Q., Zhang, Y., Li, B., Wang, J., Xing, X., & Li, L. (2021). Engineering polyphenols with biological functions via polyphenol-protein interactions as additives for functional foods. Trends in Food Science & Technology, 110, 470–482. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.009
15. Mattioli, R., Francioso, A., Mosca, L., & Silva, P. (2020). Anthocyanins: A Comprehensive Review of Their Chemical Properties and Health Effects on Cardiovascular and Neurodegenerative Diseases. Molecules 2020, Vol. 25, Page 3809, 25(17), 3809. https://doi.org/10.3390/MOLECULES25173809
16. Mehra, R., Kumar, H., Kumar, N., Ranvir, S., Jana, A., Buttar, H. S., Telessy, I. G., Awuchi, C. G., Okpala, C. O. R., Korzeniowska, M., & Guiné, R. P. F. (2021). Whey proteins processing and emergent derivatives: An insight perspective from constituents, bioactivities, functionalities to therapeutic applications. Journal of Functional Foods, 87, 104760. https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104760
17. Moreno-García, K. L., Antunes-Ricardo, M., Martínez-Ávila, M., Milán-Carrillo, J., & Guajardo-Flores, D. (2022). Evaluation of the antioxidant, anti-inflammatory and antihyperglycemic activities of black bean (Phaseolus vulgaris L.) by-product extracts obtained by supercritical CO2. The Journal of Supercritical Fluids, 183, 105560. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105560
18. Peighambardoust, S. H., Karami, Z., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2021). A Review on Health-Promoting, Biological, and Functional Aspects of Bioactive Peptides in Food Applications. Biomolecules, 11(5), 631. https://doi.org/10.3390/biom11050631
19. Platzer, M., Kiese, S., Herfellner, T., Schweiggert-Weisz, U., Miesbauer, O., & Eisner, P. (2021). Common trends and differences in antioxidant activity analysis of phenolic substances using single electron transfer based assays. Molecules, 26(5). https://doi.org/10.3390/MOLECULES26051244,
20. Qin, P., Wang, T., & Luo, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. Journal of Agriculture and Food Research, 7, 100265. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265

21. Ray, S. K., & Mukherjee, S. (2021). Evolving Interplay Between Dietary Polyphenols and Gut Microbiota—An Emerging Importance in Healthcare. Frontiers in Nutrition, 8. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.634944
22. Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3
23. Ren, S., Jiménez-Flores, R., & Giusti, M. M. (2021). The interactions between anthocyanin and whey protein: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 20(6), 5992–6011. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12854
24. Ribas-Agustí, A., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R., & Elez-Martínez, P. (2018). Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(15), 2531–2548. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1331200
25. Rios-Villa, K. A., Bhattacharya, M., La, E. H., Barile, D., & Bornhorst, G. M. (2020). Interactions between whey proteins and cranberry juice after thermal or non-thermal processing during in vitro gastrointestinal digestion. Food & Function, 11(9), 7661–7680. https://doi.org/10.1039/D0FO00177E
26. Rivero Meza, S. L., Hirsch Ramos, A., Cañizares, L., Raphaelli, C. de O., Bueno Peres, B., Gaioso, C. A., Egea, I., Estrada, Y., Flores, F. B., & de Oliveira, M. (2023). A review on amaranth protein: composition, digestibility, health benefits and food industry utilisation. International Journal of Food Science & Technology, 58(3), 1564–1574. https://doi.org/10.1111/ijfs.16056
27. Serena-Romero, G., Ignot-Gutiérrez, A., Conde-Rivas, O., Lima-Silva, M. Y., Martínez, A. J., Guajardo-Flores, D., & Cruz-Huerta, E. (2023). Impact of In Vitro Digestion on the Digestibility, Amino Acid Release, and Antioxidant Activity of Amaranth (Amaranthus cruentus L.) and Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen) Proteins in Caco-2 and HepG2 Cells. Antioxidants, 12(12), 2075. https://doi.org/10.3390/ANTIOX12122075/S1
28. Sloan, A. (2025). The top 10 funtional food trends. IFT. https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2025/april/features/the--top-10-functional-food--trends
29. Stobiecka, M., Król, J., & Brodziak, A. (2022). Antioxidant Activity of Milk and Dairy Products. Animals, 12(3), 245. https://doi.org/10.3390/ani12030245
30. Wang, Y., Yang, C., Zhang, J., & Zhang, L. (2022). Interaction between whey protein isolate and rose anthocyanin extracts at different pHs: Structure, emulsification and digestibility of complexes. Food Bioscience, 49, 101888. https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.101888
31. Wu, H., Oliveira, G., & Lila, M. A. (2023). Protein-binding approaches for improving bioaccessibility and bioavailability of anthocyanins. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(1), 333–354. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13070
32. Xue, H., Zhao, J., Wang, Y., Shi, Z., Xie, K., Liao, X., & Tan, J. (2024). Factors affecting the stability of anthocyanins and strategies for improving their stability: A review. Food Chemistry: X, 24, 101883. https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101883
33. Yiğit, A., Bielska, P., Cais-Sokolińska, D., & Samur, G. (2023). Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. Journal of the American Nutrition Association, 42(8), 758–768. https://doi.org/10.1080/27697061.2023.2169208
34. Zhang, Q., Cheng, Z., Wang, Y., & Fu, L. (2021). Dietary protein-phenolic interactions: characterization, biochemical-physiological consequences, and potential food applications. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(21), 3589–3615. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1803199
35. Zhang, Y., Cai, P., Cheng, G., & Zhang, Y. (2022). A Brief Review of Phenolic Compounds Identified from Plants: Their Extraction, Analysis, and Biological Activity. Natural Product Communications, 17(1), 1934578X2110697. https://doi.org/10.1177/1934578X211069721

ESTABILIDAD DEL COLOR DE UNA FIBRA NATURAL TEÑIDA CON CÁSCARA DE CACAO CONTRA EL COLORANTE SINTÉTICO

Gabriela Arroyo Figueroa*, Diana Paola Ledezma Pérez, Tarsicio Medina Saavedra, Jorge Gustavo Dzul Cauich.

Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra, División de la salud e ingenierías, Departamento de Ingeniería Agroindustrial.
g.arroyo@ugto.mx

RESUMEN

En la actualidad, el empleo de subproductos agroindustriales contribuye al crecimiento de alternativas ecológicas en la industria textil. El cacao (*Theobroma cacao* L.) es originario de México y solo se utiliza la baya, por lo que dentro de los subproductos agroindustriales se integra la cáscara de cacao que generalmente se desecha, por lo que se desea dar una aplicación innovadora a la cáscara de cacao y así contribuir a la reducción de desechos y a la aplicación de colorantes más sostenibles dentro de los textiles. El objetivo de este trabajo fue comparar la estabilidad del algodón teñido con la cáscara de cacao contra el colorante sintético. La metodología consistió en teñir la fibra de algodón con el extracto hidrosoluble de la cáscara de cacao y analizar el color mediante un colorímetro usando las coordenadas CIELab*. Posteriormente realizar las pruebas de estabilidad del color en las fibras teñidas (pH, frote en seco, alta temperatura, lavado con jabón, y luz artificial), y calcular el parámetro delta E (diferencia del color entre las coordenadas de los valores iniciales con respecto a los valores después de realizar las pruebas de estabilidad), usando la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado de cada coordenada CIELab* y finalmente comparar con las mismas pruebas aplicadas a la fibra teñida de algodón con colorante sintético, por medio de un análisis estadístico (ANOVA simple) en el programa Statgraphics plus 5, cotejando el parámetro de delta E. Como resultado se encontró diferencia significativa entre los valores de delta E de las pruebas de estabilidad de: frote en seco, alta temperatura, lavado con jabón y luz artificial, siendo más alto los valores de delta E para la fibra teñida con cáscara de cacao en comparación con el colorante sintético, para la prueba de estabilidad al frote en seco el valor más alto se obtuvo para la fibra teñida con el colorante sintético. En el caso de las pruebas de estabilidad al pH (5 y 9) no hubo diferencias significativas entre la fibra teñida con colorante natural y colorante sintético. Por lo que se puede concluir que en el teñido de algodón con el extracto de la cáscara de cacao es resistente al frote en seco y pH, en comparación con el algodón teñido con colorante sintético. Estos resultados pueden resultar muy importantes en la práctica del teñido con cáscara de cacao y en control calidad de las prendas realizadas con esta fibra natural.

Palabras clave: colorante natural, residuos de cacao, algodón.

INTRODUCCIÓN

En México, nuestros antepasados usaban colorantes naturales provenientes de insectos, plantas y minerales, para teñir pieles y fibras (Álvarez, et al., 2017). Destacando su importancia cultural, económica e histórica, resaltan diversos materiales naturales tintóreos dentro de una gran diversidad como son: Cempaxúchitl, el añil, el palo Brasil, la cáscara de cacao, el palo campeche, el caracol púrpura y la grana cochinilla. Estos dos últimos son los únicos animales tintóreos que se conocen en México (Guzmán y Rodríguez, 2011). La industria textil emplea tintes artificiales aplicando estos en las fibras de algodón, los cuales han resultado perjudiciales para la salud como reacciones alérgicas, hiperactividad, neurotoxicidad y toxicidad (López et al., 2018). mientras que los colorantes naturales presentes en una gran variedad de alimentos son benéficos para la salud como los antioxidantes. A mediados del siglo XIX el químico William Henry obtuvo el primer colorante sintético de la mano del químico llamado August Wilhelm Von Hofmann al sintetizar quinina mediante oxidación de anilina.

Después de dicha composición Henry separo la quinina obteniendo malveína un color de tonalidad purpura.

A partir de dicho descubrimiento se comenzaron a fabricar y crear una gran variedad de colorantes sintéticos (Miralles, 2018), encargados de sustituir a los colorantes naturales que nuestros antepasados venían utilizando consecutivamente para teñir prendas de vestir, así como decoración de cerámica, para decorar madera y usándolo como cosméticos, debido a lo antes mencionado, es necesario retomar la utilización de colorantes naturales, ya que estos son más respetuosos con la naturaleza y se los obtiene de varias fuentes entre las que se cuentan los vegetales, animales y microorganismos (Arroyo et al., 2018).

El cacao (*cacao* L.) es una planta originaria de México cuyo principal uso se centra en las semillas contenidas dentro de su baya. El estilo de vida de la sociedad actual conlleva un continuo incremento del consumo de cacao y sus derivados, esta creciente demanda tiene como principal consecuencia un aumento en la generación de residuos. El sector del chocolate produce cada año aproximadamente 700 000 toneladas de biomasa; en concreto, vaina de cacao, pulpa y cascarilla del cacao (Pérez A. et al., 2024) siendo esta, la parte externa que cubre el grano de cacao y que supone un 10-20% de su peso total, es generada como subproducto durante el proceso de tostado en la industria chocolatera y en su mayoría de veces, es descartada como residuo la cual conlleva un impacto ambiental y una pérdida de material orgánico potencialmente aprovechable. Por esto, surge la necesidad de encontrar aplicaciones innovadoras para este residuo, explorando su viabilidad en distintos sectores industriales, como el textil, donde el uso de colorantes naturales se a remplazado significativamente por el uso de colorantes sintéticos y con esto se ha despertado un gran interés debido a la creciente preocupación por la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental de los tintes sintéticos. Durante los últimos 10 años genero un impacto significativo el gran uso y aplicación de colorantes sintéticos en la industria textil. Por otro lado, la industria textil tiene una muy baja productividad y aplicación de colorantes naturales debido a que la extracción de estos no es viable económicamente, sin embargo, los colorantes sintéticos no alcanzan a ofrecer las mismas ventajas que se obtiene de los colorantes naturales (Guerrero, 2011).

La estabilidad de color es la capacidad de resistir el desgaste o el desvanecimiento que con mayor frecuencia resulta de la limpieza o exposición a la luz. Delta E, se refiere a la evaluación del color es más que una expresión numérica. Por lo general, es una evaluación de la diferencia del color (delta) con respecto a un estándar conocido. En general. Existen varias pruebas para evaluar la solidez de color en distintas fibras algunas de ellas son: Solidez de color al lavado, solidez de color a la luz, solidez de color al frotamiento. Las pruebas de solidez del color al lavado miden la capacidad de una tela para retener su color después de someterse al lavado (esta prueba evalúa los efectos de los procesos de lavado doméstico o comercial en el color de la tela). La prueba de solidez del color a la luz mide la capacidad de una tela para mantener su color cuando se expone a la luz (evalúa los efectos de fuentes de luz natural y artificial en el color de la tela, asegurando la durabilidad y longevidad de textiles que están regularmente expuestos a la luz). La prueba de solidez del color al frotamiento mide la capacidad de una tela para resistir la transferencia de color de la superficie del textil a otra superficie a través de la fricción (es esencial para asegurar que los textiles no destiñan o manchen otros materiales cuando se someten al frotamiento, lo cual es particularmente importante para artículos como ropa, tapicerías y revestimientos textiles de suelo). Las pruebas de solidez del color a la transpiración miden la capacidad de una tela para mantener su color cuando se expone al sudor humano. Esta prueba es crítica para textiles que están en contacto directo con la piel, como ropa deportiva, ropa interior y otras prendas de vestir. La prueba de solidez del color al agua de mar mide la capacidad de una tela para mantener su color cuando se expone al agua de mar (aplica para textiles que están en contacto frecuente con el agua de mar, como trajes de baño, ropa de playa y textiles marinos). La prueba de solidez del color al agua clorada mide la capacidad de una tela para mantener su color cuando se expone al agua clorada, comúnmente encontrada en piscinas (es crucial para textiles frecuentemente usados en ambientes clorados, como trajes de baño, batas de playa y toallas) (Qima, 2025).

OBJETIVO

Realizar una comparación de la estabilidad del teñido en una fibra de algodón con un extracto hidrosoluble de cáscara de cacao y su comparación con un colorante sintético en términos de solidez de color.

PARTE EXPERIMENTAL

Teñido de fibra

La técnica consistió en teñir una fibra de algodón con el extracto hidrosoluble de la cáscara de cacao. Este último, se obtuvo mediante una maceración de la cáscara de cacao en suficiente agua, llevándola a hervir durante 30 min, a partir de ahí se macero durante 24 horas, el resultado se filtró. Y se aplicó en un proceso de teñido de pre-mordentado de la fibra de algodón. Se mordento la fibra de algodón con alumbre, colocando la fibra de algodón ya lavada en un recipiente con agua desionizada y el alumbre en un 30 % sobre el peso de la fibra, y poniendo en ebullición durante 30 min. Posteriormente se enjuago la fibra de algodón y se colocó nuevamente en un recipiente con agua desionizada y se agregó el extracto hidrosoluble sobre la fibra de algodón mordentada, dejando en ebullición durante 30 min. Una vez obtenida la fibra teñida se analizó el color utilizando un colorímetro CR 400 marca Minolta. Midiendo las coordenadas exactas del CIELab*, las cuales consisten en L* mide la claridad (L* alto) u oscuridad (L* bajo), a* y b* representan la cromaticidad y matiz de la muestra (-a* indica colores en la dirección verde, +a* indica colores en la dirección roja, -b* indica colores en la dirección azul, +b indica colores en la luminosidad amarilla).

Estabilidad de color

Para evaluar la estabilidad de color en las fibras de algodón se realizaron pruebas de (pH a diferentes niveles (5 y 9). La prueba de frote en seco se llevó a cabo con un Frotimetro. Las pruebas de alta temperatura, solidez al pH y lavado doméstico, fueron elaborada en un Gester GT-D15. La prueba de exposición a la luz se realizó dentro de una cámara de luz artificial. Estas pruebas fueron elaboradas por triplicado. El cambio de color resultante de dichas pruebas fue determinado mediante el cálculo del parámetro delta E (diferencia del color entre las coordenadas de los valores iniciales con respecto a los valores después de realizar las pruebas de estabilidad) a partir de la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado de cada coordenada del CIELab* (Ecuación no. 1), cuantificando así la variación cromática de la fibra de algodón teñida.

$$\Delta E=\sqrt{\Delta L^{*2}+\Delta b^{*2}+\Delta a^{*2}} \quad \text{Ecuación no. 1}$$

Análisis comparativo

Se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos mediante ANOVA simple en el programa Statgraphics Plus 5, utilizando el parámetro delta E como criterio de comparación.

RESULTADOS

Teñido de fibra

En la fotografía no. 1 se muestra el resultado de las tres réplicas de la fibra de algodón teñida con el extracto hidrosoluble de la cáscara de cacao. Se puede observar que la fibra de algodón tomo un color crema.

Figura no.1. Color de la tela de algodón después del teñido con el extracto de la cáscara de cacao.

Estabilidad de color

En las pruebas de frote en seco, la fibra de algodón teñida con extracto de cáscara de cacao presentó un valor muy bajo de delta E (0.46 ± 0.03), lo que indica una mínima variación en el color tras el frote. En contraste, la fibra teñida con colorante sintético mostró un valor de delta E significativamente mayor (45.13 ± 0.37), lo que evidencia una menor estabilidad del color en esta condición. En la prueba de alta temperatura, la fibra teñida con cáscara de cacao mostró un delta E más alto (7.29 ± 0.39) en comparación con la fibra teñida con colorante sintético (1.52 ± 0.12), lo cual indica que la coloración natural es más susceptible a los cambios de temperatura, mientras que el colorante sintético ofrece mayor resistencia. En la prueba de lavado doméstico los valores de delta E fueron similares entre ambas fibras: 2.92 ± 0.09 para la fibra con cáscara de cacao y 1.48 ± 0.56 para la fibra con tinte sintético. Aunque hay una diferencia estadísticamente significativa.

En exposición a luz artificial presentó un delta E de 1.37 ± 0.74, mientras que la teñida con colorante sintético fue de 0.22 ± 0.13. Se observó diferencia estadísticamente significativa, indicando una mayor resistencia de la fibra teñida con colorante sintético que la teñida con cáscara de cacao (Tabla 1).

En el caso de las pruebas de estabilidad pH en las diferentes variaciones de (5 y 9) que se realizaron en ambos colorantes, los valores de delta E no presentaron diferencias significativas, bajo condiciones ácidas, la fibra teñida con cacao tuvo un delta E de 3.08 ± 1.03, mientras que la sintética registró 2.56 ± 0.13. Lo cual indica una estabilidad comparable del colorante natural frente a medios ácidos. Bajo condiciones alcalinas, la fibra teñida con cacao tuvo un delta E de 3.39 ± 0.47, mientras que la sintética registró 2.63 ± 0.35. Lo cual indica una estabilidad comparable del colorante natural frente a medios básicos. La fibra teñida con extracto de cáscara de cacao mantiene su color frente a cambios en la acidez o alcalinidad del medio, de manera similar al colorante sintético, como se observa en la (Tabla 1).

Análisis comparativo

Tabla 1. Valores promedio de delta E obtenidos en pruebas de solidez del color en fibra natural teñida con colorante de cáscara de cacao y colorante sintético.

	Valores de promedio de delta E	
Prueba	Colorante cáscara de cacao	Colorante sintético
Frote en seco	0.46±0.03[a]	45.13±0.37[b]
Altas temperaturas	7.29±0.39[a]	1.52±0.12 [b]
Lavado doméstico	2.92±0.09[a]	1.48±0.56 [b]
Luz artificial	1.37±0.74[a]	0.22±0.13 [b]
pH (5)	3.08±1.03[a]	2.56±0.13[a]
pH (9)	3.39±0.47[a]	2.63±0.35[a]

Letras iguales en la misma fila indican que no hay diferencia significativa entre los valores promedio de delta E (p > 0.05); letras diferentes indican diferencia significativa (p < 0.05).

Dichos resultados muestran las ventajas factibles de la utilidad, así como el control de calidad de extractos hidrosolubles naturales como la cáscara de cacao, resaltando también el impacto ambiental que se podría lograr con su aplicación en la industria textil.

CONCLUSIÓN

Con esta investigación logra demostrar la importancia de retomar el uso de colorantes naturales en la industria textil. Se demostró la viabilidad de la aplicación del colorante natural de cáscara de cacao en fibras de algodón, por su gran durabilidad, y estabilidad de color en algunas pruebas de solidez, contra un colorante sintético, aunque, en pruebas como la exposición a altas temperaturas, lavado doméstico y luz artificial, el colorante sintético mostró una mayor resistencia al cambio de tonalidad, la fibra teñida con cáscara de cacao destacó positivamente en la prueba de frote en seco, con un menor valor de delta E que el colorante sintético, indicando una mayor solidez del color en esa condición. Mostrando que sería un gran producto agroindustrial no solo como estrategia de aprovechamiento de residuos y reducción del impacto ambiental, sino también como una opción real y funcional dentro del teñido textil.

REFERENCIAS

1. Álvarez Canelo, J. G., & Arroyo Figueroa, G. (2017). “Teñido de fibras naturales con colorantes naturales”. jóvenes en la ciencia. 3(2). 2316–2320. Recuperado en: https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1933.
2. Arroyo Figueroa, G., Dzul Cauch J., Vargas Rodríguez L., Medina Saavedra, T. (2018). “Evaluación de la solidez del color en el teñido de lana y algodón con extracto de cáscara de cacao”. Universidad de Guanajuato. Vol. 5 no. 16, Revista de simulación y laboratorio. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Simulacion_y_Laboratorio/vol5num16/Revista_de_Simulacion_y_Laboratorio_V5_N16_3.pdf.
3. Guerrero Escobar D. P. (2011). “Extracción y evaluación de un colorante natural a partir de la pepa de aguacate para el teñido de las fibras de algodón y poliéster”. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/1757.
4. Guzmán J. y Rodríguez N. (2011). “La diversidad tintórea de México. Universidad autónoma nacional de México”. https://ciencia.unam.mx/leer/25/La_diversidad_tintorea_de_Mexico
5. López, A., López, E., Gil, E., Caicedo, M., & Mendoza, M. (2018). “Caracterización de frutos, semillas y fibras de Gossypium barbadense algodón Pardo”. Sciendo, 21(3), 301-304. DOI: https://doi.org/10.17268/sciendo.2018.032.
6. Miralles Doménech, V. (2018). “Estudio de la cinética de tintura de fibras de algodón con colorantes naturales”. Tesis de maestría de la Universidad Politécnica de Valencia, Campus D’Alcoi. Recuperado en: https://core.ac.uk/download/pdf/275631235.pdf.
7. Pérez, A. L., Pérez, A. L., Macfarlane, B. A. N., & Sánchez, M. (2024). “Cascarilla de cacao, de residuo de la industria chocolatera a materia prima para la obtención de bioplásticos”. The Conversation. http://theconversation.com/cascarilla-de-cacao-de-residuo-de-la-industria-chocolatera-materiaprima-para-la-obtencion-de-bioplasticos-237884.
8. Qima (2025). “Colorfastness Test Methods for Textiles: Complete Guide”. Recuperado en: https://blog.qima.es/textile/colorfastness-test-methods-for-textiles-guide

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADO SOBRE LAS PROTEÍNAS DEL GRANO DE AMARANTO

Abigail Morales-Venegas, Martin Barajas-Segoviano, Gustavo Hernández-Mendoza, Raúl Reyes-Bautista*

Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón.
*raul.rb@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

El estudio titulado “Optimización del proceso de digestión gastrointestinal simulado sobre las proteínas del grano de Amaranto” tuvo como objetivo optimizar el proceso de hidrólisis utilizando un sistema de digestión gastrointestinal simulada en las proteínas del grano de amaranto, destacando tanto propiedades tecnofuncionales como funcionales, tales como actividades antihipertensivas, antidiabéticas, antioxidantes y antimicrobianas. La extracción proteica se realizó mediante técnicas de salting in y salting out con Na_2SO_4 y $(NH_4)_2SO_4$, respectivamente. La hidrólisis fue llevada a cabo con las enzimas pepsina y pancreatina, y el grado de hidrólisis (GH) se midió mediante la cuantificación de grupos amino libres. Se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) con un diseño central compuesto para optimizar los factores de tiempo y relación enzima/sustrato (E/S). Los resultados mostraron un rendimiento de proteína extraída del 85.3 % (12.34 g/100 g de harina). Con 60 minutos y una relación E/S de 1:30 (w/w), la pepsina logró un GH del 24.2 %, y al incorporar pancreatina se alcanzó un GH acumulado del 53.3 % en 135 minutos con una relación E/S de 1:15 (w/w). Se encontró mediante la MSR un GH máximo de 31.36 % con pepsina a una relación E/S de 1:35 (56 min) y un GH de 64.30 % con pancreatina a una relación E/S de 1:18 (71 min), con modelos matemáticos explicando aproximadamente el 90 % de la variabilidad. Mediante la MSR se evidencio que es posible obtener hidrolizados proteínicos funcionales y tecnofuncionales a partir del amaranto, útiles para el desarrollo de alimentos funcionales e innovaciones industriales.

INTRODUCCIÓN

Los hidrolizados proteínicos son productos obtenidos a partir de la ruptura controlada de proteínas mediante procesos enzimáticos, lo que da lugar a péptidos más pequeños y aminoácidos libres. Estos compuestos presentan mejoras significativas en diversas propiedades tecnofuncionales que los hacen atractivos para su incorporación en formulaciones alimentarias, entre estas propiedades se incluyen una baja viscosidad, una mayor capacidad de emulsión, una mejor dispersión en diferentes medios y una alta solubilidad. Todas estas ventajas representan una mejora frente a las proteínas originales no hidrolizadas, ya que permiten un uso más versátil en la industria alimentaria, incluyendo bebidas, panadería, y suplementos nutricionales, entre otros.

Sin embargo, más allá de sus beneficios tecnofuncionales, investigaciones recientes han demostrado que los hidrolizados proteínicos también poseen propiedades funcionales de gran interés en el ámbito de la salud. Entre estas propiedades destacan las actividades antihipertensivas, antidiabéticas, antioxidantes y antimicrobianas. Estas funciones biológicas amplían aún más el potencial de aplicación de los hidrolizados, no solo como ingredientes funcionales sino también como agentes preventivos o terapéuticos en el diseño de alimentos funcionales y nutracéuticos.

En este contexto, el presente estudio se enfocó en la mejora del proceso de hidrólisis enzimática mediante la aplicación de un sistema de digestión gastrointestinal simulada utilizando como materia prima las proteínas extraídas del grano de amaranto *(Amaranthus spp.),* un pseudocereal reconocido por su elevado contenido proteico y su perfil de aminoácidos de alta calidad [1]. El objetivo principal fue optimizar las condiciones del proceso enzimático, utilizando metodologías experimentales que permitieran maximizar el grado de hidrólisis.

TEORÍA

El amaranto *(Amaranthus spp)* se considera frecuentemente una alternativa prometedora a los cereales tradicionales, a diferencia de la mayoría de los cereales tradicionales, el amaranto se caracteriza por una composición equilibrada de aminoácidos, que incluye todos los aminoácidos esenciales, la ausencia de gluten en su grano y altos niveles de fibra dietética, antioxidantes (polifenoles, escualeno, α-tocoferol), macro y microelementos (hierro, calcio, magnesio, zinc), compuestos fitoquímicos y péptidos bioactivos [2].

Los péptidos bioactivos son fragmentos específicos de proteínas que, al ser liberados, pueden ejercer efectos positivos sobre diversas funciones fisiológicas, influyendo de manera favorable en la salud. Entre sus principales actividades se incluyen efectos antimicrobianos, la reducción de la presión arterial, actividad agonista o antagonista de receptores opioides, así como propiedades anticolesterolémicas, antitrombóticas y antioxidantes. Algunos de estos péptidos son multifuncionales, es decir, pueden presentar más de una actividad biológica simultáneamente. En su estado natural, estos péptidos permanecen inactivos al estar encriptados dentro de la estructura de la proteína. Sin embargo, pueden ser liberados a través de distintos mecanismos: la digestión (in vitro o in vivo), la fermentación de proteínas, y mediante hidrólisis enzimática. [3].

Los hidrolizados proteicos se obtienen mediante un proceso, el cual implica la acción controlada de enzimas externas y aisladas. La hidrólisis proteínica consiste en la ruptura de los enlaces peptídicos presentes en las proteínas, lo que da lugar a fragmentos más pequeños, como péptidos y aminoácidos libres [4].

El grado de hidrólisis (GH) es un parámetro clave en el estudio de la digestión de proteínas, especialmente cuando se busca obtener péptidos bioactivos con beneficios para la salud. Optimizar este grado de hidrólisis dentro de sistemas que simulan la digestión gastrointestinal resulta fundamental, ya que permite maximizar la liberación de estos fragmentos funcionales. Para lograrlo, es necesario controlar y ajustar diversas variables, tales como la concentración de las enzimas utilizadas, el tiempo durante el cual actúan, el pH y la temperatura del proceso. Estos factores influyen directamente en la capacidad de romper los enlaces peptídicos que mantienen unidas a las proteínas [5].

La simulación in vitro de la digestión gastrointestinal, que habitualmente emplea enzimas como la pepsina y la pancreatina, ofrece un modelo aproximado de lo que sucede en nuestro cuerpo durante la digestión. A través de esta técnica, se puede evaluar no solo la eficiencia con la que se liberan los péptidos, sino también la estabilidad y funcionalidad que estos mantienen en condiciones similares a las fisiológicas. Más allá de facilitar la absorción y disponibilidad de nutrientes, la optimización del GH abre la puerta para potenciar propiedades biológicas específicas de los péptidos, como su actividad antioxidante, antihipertensiva o antiinflamatoria, contribuyendo así a la promoción de la salud a través de la alimentación [6].

PARTE EXPERIMENTAL

La extracción de la fracción proteínica se llevó a cabo a través de técnicas de precipitación selectiva conocidas como salting in y salting out, las cuales permiten la separación y concentración de proteínas en función de su solubilidad en soluciones salinas. En la etapa de salting in, se utilizó sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 5 %, lo que facilitó la solubilización inicial de las proteínas presentes en la harina de amaranto [7]. Posteriormente, en la etapa de salting out, se empleó sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) con una saturación del 85 %, lo que provocó la precipitación de las proteínas al reducir su solubilidad, permitiendo así su recuperación mediante centrifugación.

Una vez obtenida la fracción proteínica, se procedió a la hidrólisis enzimática, la cual se realizó utilizando dos enzimas clave en la simulación del proceso digestivo humano: pepsina y pancreatina. La pepsina, una enzima activa en medio ácido (pH 2), replicó la primera etapa gástrica de la

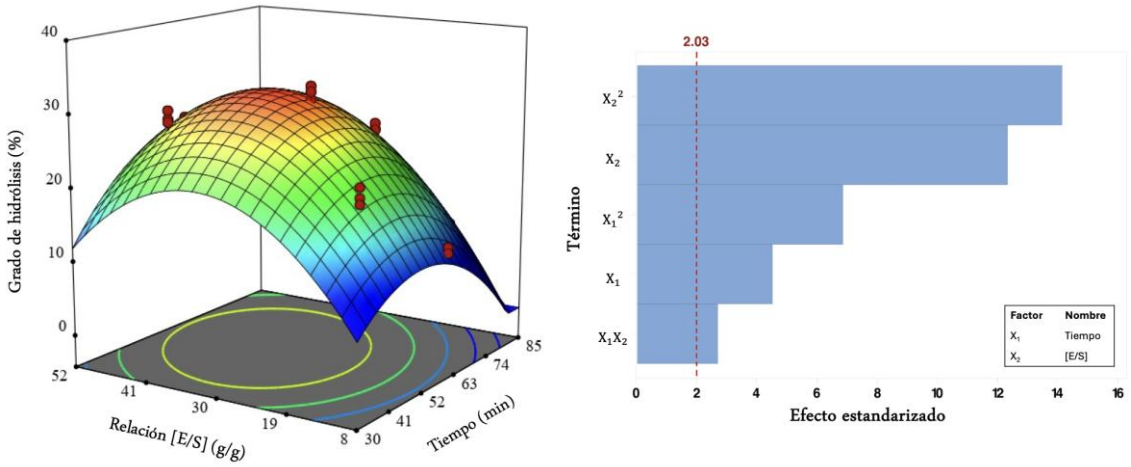
digestión, mientras que la pancreatina, que actúa en condiciones neutras (pH 6.8), simuló la fase intestinal. Ambas enzimas fueron aplicadas bajo condiciones controladas de temperatura (37 °C) y tiempo (60-90 min), con el fin de garantizar una hidrólisis eficiente y reproducible. Para cuantificar el grado de hidrólisis (GH), se midió la concentración de grupos amino libres generados durante el proceso, ya que estos son indicativos de la ruptura de enlaces peptídicos [5].

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso y maximizar la obtención de péptidos bioactivos, se implementó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), una herramienta estadística que permite modelar y analizar los efectos simultáneos de múltiples variables independientes [8]. En este caso, se utilizó un diseño central compuesto para evaluar la influencia del tiempo de reacción (45, 60 y 75 min) y la relación enzima/sustrato (E/S) [1:15, 1:30 y 1:45 w/w] sobre el grado de hidrólisis.

RESULTADOS

La extracción de la fracción proteínica permitió obtener un rendimiento del 85.3 ± 3.19 %, equivalente a 12.34 g de proteína por cada 100 g de harina de amaranto. El diseño exploratorio indicó que, con un tiempo de 2 horas y una relación E/S de 1:20 (w/w), la hidrólisis ácida con pepsina generó un grado de hidrólisis (GH) del 24.2 ± 1.83 %, al incorporar un segundo sistema proteolítico con pancreatina, el GH acumulado alcanzó el 53.3 ± 2.09 % en un tiempo de 3.5 horas y con una relación E/S de 1:5 (w/w).

La optimización llevada a cabo mediante MSR permitió identificar un valor máximo de GH del 31.36 ± 0.89 % (Fig. 1).

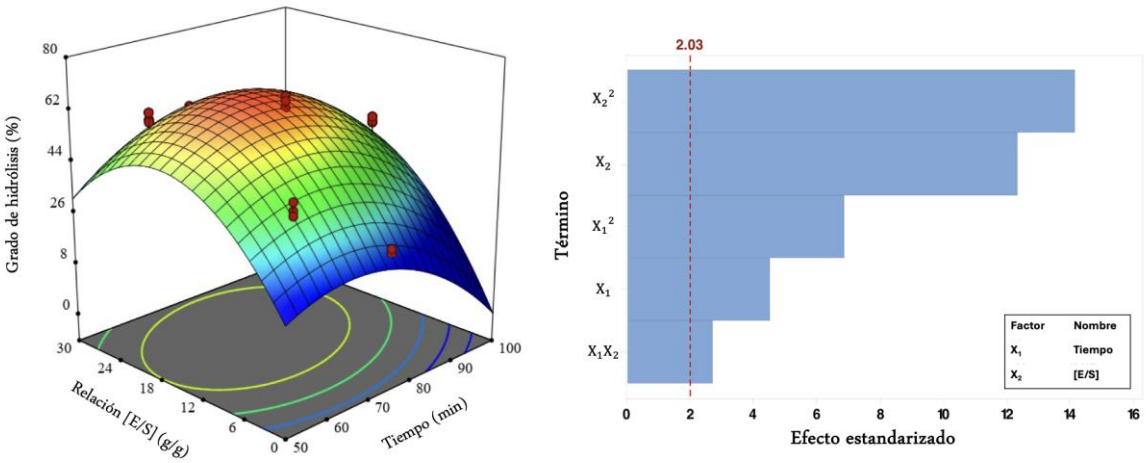


$$\mathbf{Y} = \mathbf{-27.39 + 1.15x_1 + 1.44x_2 - 0.012x_1^2 - 0.025x_2^2 + 0.0066x_1x_2}$$

$$\mathbf{R_{aj}^2 = 0.89}$$

Figura 1. Superficie de respuesta y diagrama de Pareto para la enzima Pepsina.

Este valor fue alcanzado utilizando un sistema asistido por pepsina, las condiciones óptimas determinadas para alcanzar este valor incluyeron una relación E/S de 1:35 w/w (56 min), así mismo se identificó un valor máximo de GH del 64.30 ± 0.89 %, con una relación E/S de 1:18 w/w (71 min) en el caso de la pancreatina (Fig. 2).



$$\mathbf{Y} = -79.7 + 3.22\mathbf{x_1} + 2.96\mathbf{x_2} - 0.025\mathbf{x_1^2} - 0.11\mathbf{x_2^2} + 0.020\mathbf{x_1x_2}$$
$$\mathbf{R_{aj}^2} = 0.90$$

Figura 2. Superficie de respuesta y diagrama de Pareto para la enzima Pancreatina.

Ambos modelos matemáticos explican ~ 90% de la variabilidad, bajo el modelo cuadrático ajustado y todos los coeficientes del modelo: lineales, cuadráticos y la intersección resultaron significativos ($p < 0.05$), para ambas enzimas.

CONCLUSIONES

La optimización de los parámetros evaluados en una digestión gastrointestinal simulada revela que es posible obtener hidrolizados proteínicos de fuentes como el amaranto, cuyas proteínas contienen secuencias encriptadas con potencial para expresar propiedades funcionales y tecnofuncionales, mismas que pueden ser utilizadas en la creación de alimentos funcionales y en el desarrollo de nuevos productos a nivel industrial, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. C. Morales Guerrero, N. Vázquez Mata, and R. Bressani Castignoli, *El amaranto: características físicas, químicas, toxicológicas y funcionales y aporte nutricio*. 2009.
2. P. Thakur, K. Kumar, and H. S. Dhaliwal, “Nutritional facts, bio-active components and processing aspects of pseudocereals: A comprehensive review,” *Food Biosci*, vol. 42, p. 101170, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.fbio.2021.101170.
3. A. Ayala-Niño, E. Contreras-López, A. Castañeda-Ovando, J. A. Sánchez-Franco, and L. G. González-Olivares, “Amaranth proteins as a source of bioactive peptides: a review,” *Int Food Res J*, vol. 27, pp. 1–15, 2019.
4. M. Domínguez Rodríguez, “Propiedades funcionales, capacidad antioxidante y contenido de fitoquímicos en hidrolizados proteínicos de amaranto germinado (Amaranthus hypochondriacus),” Universidad Autónoma de Sinaloa , Culiacán, 2019.
5. J. Adler-Nissen, “Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid,” *J Agric Food Chem*, vol. 27, no. 6, pp. 1256–1262, Nov. 1979, doi: 10.1021/jf60226a042.
6. H. Yang *et al.*, “Hydrolysis Process Optimization and Functional Characterization of Yak Skin Gelatin Hydrolysates,” *J Chem*, vol. 2019, pp. 1–11, Oct. 2019, doi: 10.1155/2019/9105605.
7. J. Soriano-Santos, S. Iwabuchi, and K. Fujimoto, “Solubility of amaranth seed proteins in sodium sulphate and sodium chloride: the main factor in quantitative extraction for analysis,” *Int J Food Sci Technol*, vol. 27, no. 3, pp. 337–346, Jun. 1992, doi: 10.1111/j.1365-2621.1992.tb02035.x.
8. H. Gutiérrez Pulido and R. de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, 3rd ed. 2012.

BIOENSAYO DE TOXICIDAD AGUDA EN CUATRO BIOMODELOS UTILIZANDO LIMPIADOR MULTIUSOS

Citlali Del Real Martínez, Karol Karla García Aguirre y Fátima Sánchez Álvarez

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas Academia de Bioingeniería, Zacatecas, Zac., México
cdelrealm2200@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se evaluó la toxicidad aguda del limpiador multiusos cuyo principal componente activo es el alquilbenceno sulfonato sodio (LAS) utilizando cuatro biomodelos: Escherichia coli, Allium cepa, Lactuca sativa L. y Artemia sp, se realizaron ensayos a diferentes concentraciones 10%, 1% y 0.02% para determinar su impacto en la que crecimiento celular, la germinación de semillas, el desarrollo radicular y la mortalidad de organismos acuáticos. Los resultados indicaron una relación dosis dependiente en los efectos tóxicos, en E. coli se observará una inhibición significativa del crecimiento bacteriano a una exposición de 10%, en Allium cepa y Lactuca sativa L. las concentraciones más altas redujeron el desarrollo radicular y la germinación disminuyendo a 62.5% en las semillas de lechuga expuestas al 10%, en Artemia sp se registró una mortalidad de 83.3%. Los resultados reflejan el impacto negativo de LAS sobre los organismos modelo, destacando su toxicidad para sistemas biológicos por lo que es necesario evaluar riesgos ambientales asociados al uso de productos de limpieza convencionales y promover desarrollo de alternativas más seguras y biodegradables.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por productos químicos de uso doméstico como detergentes o limpiadores es importante debido a su persistencia en los ecosistemas y su impacto en los organismos vivos, en este estudio se trabaja con un limpiador multiuso que tiene como principal activo el alquilbenceno sulfonato de sodio (LAS). siendo un tensioactivo aniónico disminuye la tensión superficial del agua lo que facilita la eliminación de grasas, esta propiedad también afecta a la integridad de las membranas celulares de microorganismos (Donaji et al., 2010), contribuye a la acumulación de LAS en cuerpos de agua donde pueden causar eutrofización y alterar dinámicas ecológicas.

Este estudio busca y valora la toxicidad aguda de fabuloso en cuatro biomodelos; Escherichia coli, Allium cepa, Lactuca sativa y Artemia sp con el objetivo de comprender su impacto sobre diferentes niveles biológicos, al analizar la respuesta biológica se obtuvo que a partir de la concentración al 1% el crecimiento de células en los biomodelos se vio afectado.

TEORÍA

Los detergentes contienen tensoactivos aniónicos como el alquilbenceno sulfonato de sodio que afectan la permeabilidad de las membranas celulares al modificar la tensión superficial del agua y dificultar la absorción de nutrientes esenciales, interactúan con los lípidos y las proteínas de la bicapa lipídica esto lleva a fugas de componentes celulares esenciales y eventualmente a la muerte celular (Calvo et al., 2016). Es importante recalcar que los detergentes comerciales incluyen aditivos y subproductos que se acumulan en el medio e inhiben la actividad de enzimas clave en el crecimiento celular y en la síntesis de biomoléculas estructurales.

Los detergentes aniónicos forman espuma lo cual limita el intercambio de oxígeno lo que afecta directamente a las raíces que dependen del oxígeno disuelto para procesos metabólicos esenciales, la falta de oxígeno puede inducir estrés oxidativo y daño en las células radiculares (Vidal et al., 2020).

PARTE EXPERIMENTAL

Evaluación citotóxica en células procariotas por microgoteo

Se prepararon tubos de 10 mL a concentraciones de 10%, 1% y 0.02% del limpiador con caldo nutritivo y 1 mL de cultivo bacteriano *E.coli.* Después se realizaron diluciones hasta $1x10^{-4}$ en tubos Eppendorf con 0.9 ml de solución salina y posteriormente se sembró por triplicado colocando 10 µl de la dilución $1x10^{-4}$ en cada casilla de una caja Petri cuadriculada, se incubó por 24 horas y se observó el crecimiento microbiano.

Ensayo de toxicidad con *Allium cepa*

Se utilizaron 9 bulbos, antes de iniciar la prueba se retiraron las capas exteriores y se cortaron las raíces a una longitud de 1 cm. Después se trabajaron concentraciones de 10%, 1% y un control, teniendo 3 bulbos por grupo experimental, se dejaron expuestos durante un periodo de 72 horas bajo luz natural y temperatura ambiente. Al finalizar el periodo, se midió la longitud de la raíz de mayor crecimiento. Los promedios de las muestras problema y el control se usaron para calcular el porcentaje de inhibición según la ecuación 1.

$$\boldsymbol{Ec.1}\ \ \boldsymbol{Inhibición\ radicular}\ (\%) = (\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{Crecimiento\ observado}}{\boldsymbol{Crecimiento\ máximo}}) \times \mathbf{100}$$

Ensayo de toxicidad aguda con semillas de *Lactuca sativa L.*

Se prepararon 9 tubos de centrifuga de 50 mL (3 tubos por grupo), se colocó en el fondo una base de algodón, 3 semillas de *Lactuca sativa* en el algodón en cada tubo y se humedeció con 3 mL en total, un grupo control (agua de la llave), al 10% y 1% de limpiador. Después de 72 horas se contó el número de semillas germinadas y se midió el crecimiento de las radicular, se calculó el porcentaje relativo de germinación (RSG), el porcentaje relativo de elongación de la raíz (RRG), índice de germinación (GI) y la tasa de germinación según las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$\boldsymbol{Ec.2}\ \ \boldsymbol{RSG}\% = \frac{\boldsymbol{\#\ de\ semillas\ germinadas\ \ en\ extracto}}{\boldsymbol{\#\ de\ semillas\ germinadas\ en\ blanco}} \times \mathbf{100}$$

$$\boldsymbol{Ec.3}\ \ \boldsymbol{RRG}\% = \frac{\boldsymbol{longitud\ radicular\ del\ extracto}}{\boldsymbol{longitud\ radicular\ del\ blanco}} \times \mathbf{100}$$

$$\boldsymbol{Ec.4}\ \ \boldsymbol{GI}\% = \frac{\boldsymbol{RSG} \times \boldsymbol{RRG}}{\mathbf{100}}$$

$$\boldsymbol{Ec.5}\ \ \boldsymbol{Tasa\ de\ germinación}(\%) = \frac{\boldsymbol{Número\ de\ semillas\ germinadas}}{\boldsymbol{Número\ total\ de\ semillas}} \times \mathbf{100}$$

Ensayo de toxicidad aguda con *Artemia sp.*

Se preparó Agua de Mar Artificial (AMA) a partir de una mezcla de sales: 23 g de NaCl, 11 g de $MgCl_2$ x $6H_2O$, 4 g de $NaSO_4$, 1.3 g de $CaCl_2$ x $2H_2O$ y 0.7 g de KCl. Se disolvió las sales en un litro de agua destilada. Las larvas de *Artemia sp.* se obtuvieron a partir de huevos desecados colocados en agua de mar artificial (AMA) durante 24 horas para su eclosión.

Se trabajo con tres grupos experimentales un control, 10% y 1% de limpiador, cada grupo por triplicado con 10 individuos. Cada grupo se colocó en placas Petri con 10 mL de AMA a temperatura ambiente bajo luz solar indirecta. Tras 72 horas, se observó el estado de las larvas mediante microscopio estereoscópico, registrando las muertes.

Se calculó el porcentaje de mortalidad usando la Ecuación 6:

$$\boldsymbol{Ec.6}\ \ \%\boldsymbol{MT} = \mathbf{100} * (\boldsymbol{Total\ de\ muertos})/((\boldsymbol{vivos} + \boldsymbol{muertos}))$$

RESULTADOS

Evaluación citotóxica en células procariotas por microgoteo

No fue posible contabilizar las unidades formadoras de colonias (UFC), sin embargo, en la figura 1 es visible como a partir de la concentración al 1% el crecimiento comienza a inhibirse en comparación a la concentración de 0.02%, siendo el 10% la concentración mayor la presencia de UFC es mínima.

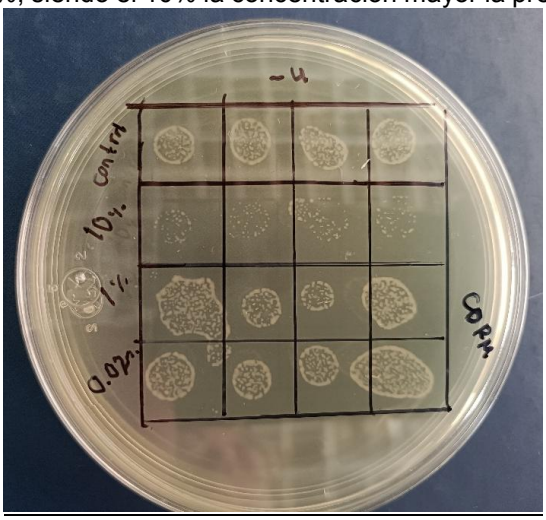


Figura 1. Crecimiento de células de E.coli expuestas a concentraciones de 10%. 1% y 0.02% de limpiador

Ensayo de toxicidad con Allium cepa

Se muestra un impacto significativo en el crecimiento radicular de *Allium cepa*, a pesar de que en la figura 2 la diferencia entre las concentraciones trabajadas es mínima o imperceptible, el crecimiento radicular sed inhibió aproximadamente 2/9 a partir de la concentración al 1% de limpiador.

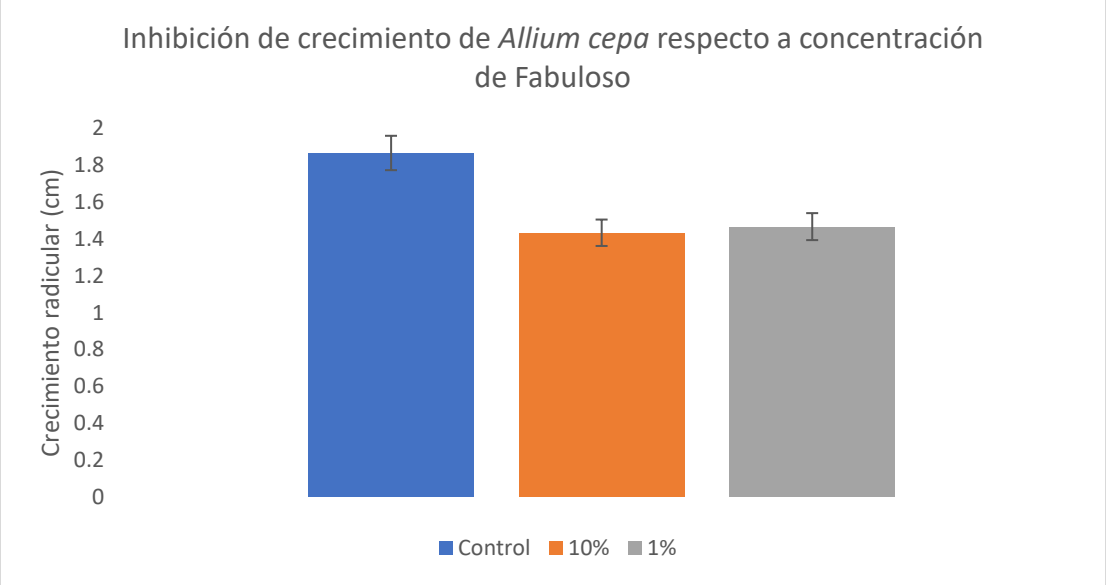


Figura 2. Resultado de inhibición de crecimiento de Allium cepa expuesta a 10% y 1% de limpiador

Ensayo de toxicidad aguda con semillas de Lactuca sativa L.

El índice de germinación de *Lactuca sativa L*. se ve afectado a partir de la concentración al 1% pues disminuye su desarrollo a menos del 50% al estar expuesto a esta concentración mínima, a pesar de ello todas las semillas germinaron en este grupo, por otro lado, a la concentración de 10% solo

germinó el 62.5% de las semillas del grupo, como se observa en la figura 3 se presenta una relación dosis-dependiente. El efecto de la concentración mayor no solo afecto la germinación de las semillas sino también en el desarrollo de la elongación de la raíz como se observa en la figura 4 pues el crecimiento de la radícula es mínimo.

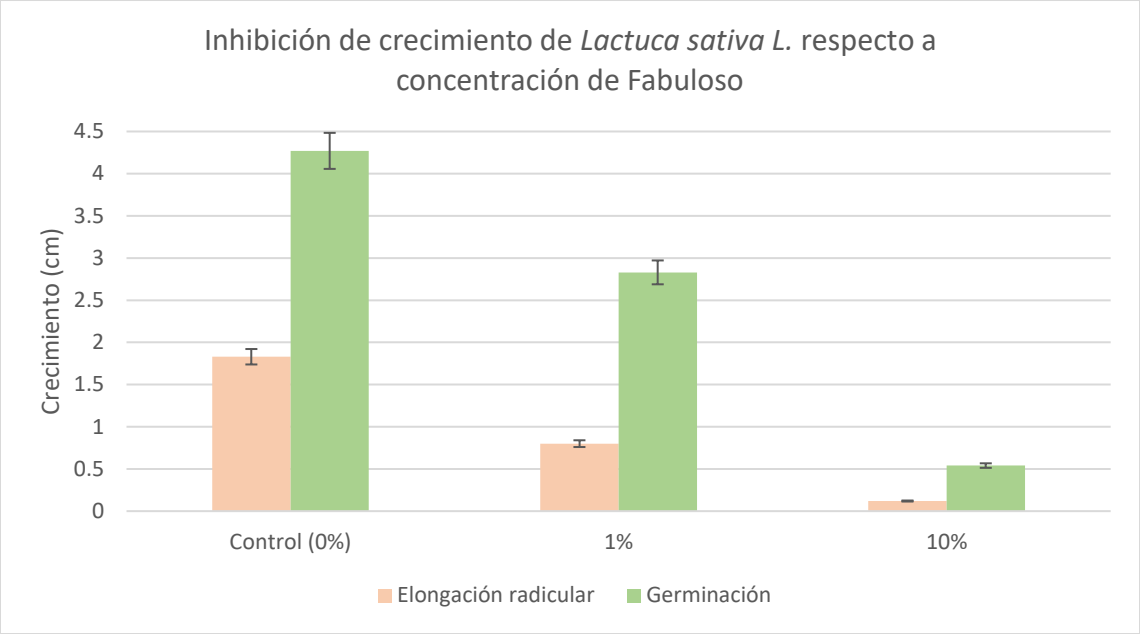


Figura 3. Resultados del ensayo de Lactuca sativa L. expuesto a 10% y 1% de limpiador

Figura 4. Germinación de semillas de Lactuca sativa L expuestas a 10%, con radícula de 0.1 cm

Tabla 1. Porcentajes de crecimiento de Lactuca sativa L. según la concentración a la que fue expuesta

Concentración de Fabuloso	Porcentaje relativo de germinación (RSG)	Porcentaje relativo de elongación de la raíz (RRG)	Índice de germinación (GI)
1%	100%	43.7%	43.7%
10%	62.5%	66.2%	41.4%

Se tiene una tasa de germinación de 77.7%

Ensayo de toxicidad aguda con Artemia sp.
Se tiene un porcentaje de mortalidad de 83.3%, ya que al pasar las 72 horas resultaron 5 Artemias vivas por caja Petri del control.

CONCLUSIONES

El limpiador multiuso ejerce efectos tóxicos significativos en todos los modelos utilizados (*E. coli , Allium cepa , Lactuca sativa* y *Artemia sp*.) con una relación dosis dependiente, la concentración más alta 10% produce los mayores niveles de inhibición de crecimiento germinación y viabilidad en los sistemas.

En *E.coli* se evidencia la capacidad del LAS para alterar la integridad de las membranas celulares y afectar procesos metabólicos esenciales.

En *Allium cepa* y *Lactuca sativa L.* se atribuyen los resultados a interferencia con la absorción de agua y nutrientes, daño celular causado por componentes químicos.

La alta mortalidad observada en *Artemia sp.* refleja la sensibilidad de organismos acuáticos al estrés químico causado por el LAS especialmente por la disminución del oxígeno disuelto.

Es necesario promover el uso de productos de limpieza con mayor biodegradabilidad, establecer regulaciones sobre el vertido de estos productos al medio ambiente y realizar más investigaciones para evaluar su impacto a largo plazo en ecosistemas naturales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Calvo Leon, Alma R. (2016). *Toxicidad y biodegradabilidad de detergentes comerciales y de su tensoactivo base* (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).
2. Donaji, J. I., A, M. M. S., & Noel, G. R. J. (2010). *Propiedades , aplicaciones y producción de biotensoactivos: una revisión*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100006
3. Vidal Laura, V. L., & Zorrilla Vivar, N. A. (2020). Efectos de un detergente aniónico con un detergente ecológico sobre los parámetros físico-químicos del agua del río Shullcas-Huancayo-2020.

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ACUAPÓNICO CON PECES PLATI (*Xiphophorus Maculatus*) Y ENERGÍA SOLAR

Sofía Valentina Calvillo Beltrán [1], Ivan Arroyo Ordoñez [1], Zaira Michel Hernandez Rocha[1] y Gabriela Elizabeth Palacios Hernández[1]

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli
1322202006@upci.edu.mx

RESUMEN

La acuaponía es un sistema sostenible que combina la acuicultura y la hidroponía, permitiendo la producción simultánea de peces y plantas con un consumo mínimo de agua y sin necesidad de fertilizantes químicos. Este trabajo tiene como objetivo realizar un sistema acuapónico utilizando peces Plati (*Xiphophorus maculatus*), para determinar los beneficios de la acuaponía frente a métodos agrícolas tradicionales en términos de sustentabilidad y productividad; mientras incorpora energía solar para reducir la dependencia de fuentes energéticas convencionales generando un impacto ambiental y social.

El sistema acuapónico consistió en un recipiente de 200 litros con peces Plati, un biofiltro biológico y una cama con sustrato inerte donde crecieron las plantas seleccionadas; fresa (*Fragaria ananassa*) y albahaca (*Ocimum basilicum*), debido a su alta capacidad de absorción de nutrientes y su impacto en el sector agroalimentario.

Para optimizar su sostenibilidad, se implementaron paneles solares que alimentaron la bomba de agua y sistema de aireación, reduciendo la dependencia de fuentes energéticas convencionales. Para validar la eficiencia del sistema, se estableció un diseño experimental de bloques completamente aleatorizados (BCA) con tres tratamientos; cultivo en suelo con fertilización química, sistema hidropónico con solución nutritiva y el prototipo acuapónico con peces y energía solar. Se evaluaron el crecimiento vegetal, la calidad del agua, el consumo de agua, la eficiencia energética y la salud de los peces durante un periodo de 90 días. Posteriormente se realizó un análisis estadístico mediante las técnicas ANOVA unidireccional y prueba de Tukey para comparar diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados indicaron que las plantas en el sistema acuapónico alcanzaron su punto de cosecha días antes que en el sistema hidropónico y el cultivo en suelo. La calidad del agua se mantuvo en niveles óptimos con concentraciones de nutrientes, asegurando el desarrollo de las plantas sin toxicidad. La eficiencia energética del sistema se confirmó con una generación suficiente para operar la bomba y el aireador sin interrupciones. En cuanto a la salud de los peces, se observó un aumento constante en la población, sin signos de estrés o enfermedades.

Desde una perspectiva social y ambiental, este prototipo representa una solución viable para la producción de alimentos en comunidades con recursos limitados, permitiendo la autosuficiencia alimentaria en entornos urbanos y rurales. Su bajo costo de mantenimiento y operación accesible facilitan su adopción en la agricultura. Promoviendo la educación ambiental y desarrollo de nuevas tecnologías en producción agrícola sustentable y sostenible fortaleciendo la seguridad alimentaria y las prácticas agrícolas responsables.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente presión sobre los sistemas agroalimentarios ha generado una necesidad urgente de transformación hacia modelos de producción más sostenibles, resilientes y eficientes. El cambio climático, la escasez de agua, la degradación del suelo, el aumento de la población mundial y la inseguridad alimentaria son factores que demandan una revisión profunda de las prácticas agrícolas convencionales. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para

la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), se estima que para el año 2050 será necesario incrementar en al menos un 60% la producción de alimentos para abastecer a una población que superará los 9,700 millones de personas, lo cual supone una carga adicional sobre los ya limitados recursos naturales.

La agricultura tradicional, aunque ha sido pilar del desarrollo humano, presenta múltiples desventajas en el contexto actual. El uso excesivo de agroquímicos, la dependencia de grandes volúmenes de agua para riego, la contaminación de cuerpos de agua por lixiviación de fertilizantes y pesticidas, así como la deforestación para ampliar áreas de cultivo, han deteriorado severamente la calidad ambiental (Tilman et al., 2002; Rockström et al., 2009). A esto se suma la vulnerabilidad de los pequeños productores rurales, quienes enfrentan dificultades económicas y técnicas para adaptarse a los desafíos climáticos y a la volatilidad del mercado agrícola. En este escenario, es urgente el desarrollo y adopción de sistemas alternativos que permitan producir alimentos de forma eficiente, con un menor impacto ambiental y adaptabilidad a diferentes entornos geográficos y socioeconómicos.

La acuaponía surge como una solución prometedora en esta transición hacia una agricultura sostenible. Este sistema integra dos disciplinas: la acuicultura (cría de peces en cautiverio) y la hidroponía (cultivo de plantas sin suelo), formando un ecosistema simbiótico donde los desechos orgánicos generados por los peces son transformados por bacterias nitrificantes en nutrientes disponibles para las plantas. A su vez, las plantas absorben estos compuestos, purificando el agua que regresa al estanque con peces, creando un ciclo cerrado que reduce significativamente el uso de agua y elimina la necesidad de fertilizantes sintéticos (Somerville et al., 2014; Goddek et al., 2015). Estudios han demostrado que este tipo de sistemas puede utilizar hasta un 90% menos agua que la agricultura tradicional, siendo ideal para regiones áridas o con acceso limitado a fuentes hídricas (Yep & Zheng, 2019).

A diferencia de otros métodos intensivos, la acuaponía permite una producción integrada de proteína animal y vegetal en espacios reducidos, sin la generación de residuos tóxicos ni emisiones significativas de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una tecnología amigable con el medio ambiente (Palm et al., 2018). Además, al tratarse de un sistema modular y escalable, puede ser adaptado a contextos urbanos, periurbanos y rurales, promoviendo la agricultura local, el autoabastecimiento alimentario y la educación ambiental. No obstante, uno de los desafíos más importantes en la operación de estos sistemas es su dependencia energética. Para mantener en funcionamiento las bombas de recirculación y sistemas de aireación, es necesario un suministro constante de energía, lo cual puede representar una barrera económica y técnica, especialmente en comunidades marginadas.

Para abordar esta limitación, diversos autores han explorado la incorporación de energías renovables, en particular la energía solar fotovoltaica, como fuente principal de abastecimiento eléctrico en sistemas acuapónicos (Suhl et al., 2016; Love et al., 2015). Esta estrategia no solo reduce los costos operativos y la dependencia de redes eléctricas convencionales, sino que también mejora la sostenibilidad del sistema, disminuyendo la huella de carbono asociada a la producción alimentaria. En contextos rurales y zonas con acceso limitado a infraestructura energética, la integración de paneles solares representa una oportunidad clave para implementar soluciones agroecológicas autosuficientes.

En términos de componentes biológicos, la elección de las especies vegetales y animales es crucial para el equilibrio del sistema. Las plantas seleccionadas deben tener una alta eficiencia en la absorción de nutrientes, ser de rápido crecimiento, y tener valor comercial o alimenticio. En este estudio se han elegido dos cultivos de alto interés: la fresa (*Fragaria ananassa*), ampliamente reconocida por su valor económico y contenido nutricional; y la albahaca (*Ocimum basilicum*), una hierba aromática con creciente demanda en el sector agroalimentario y farmacéutico. Ambas especies han mostrado resultados favorables en sistemas hidropónicos y acuapónicos, con buenos rendimientos y tolerancia a condiciones controladas (Monsees et al., 2017; Delaide et al., 2016).

Respecto a la especie acuática, se optó por el pez Plati (*Xiphophorus maculatus*), una especie ornamental de agua dulce que destaca por su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, resistencia a enfermedades, facilidad de manejo y reproducción rápida. Estas características lo hacen especialmente útil en sistemas de pequeña escala con fines educativos, experimentales o comunitarios, ya que reduce los riesgos operativos asociados al manejo de peces más exigentes como la tilapia o el bagre (Rodríguez-Montes de Oca et al., 2021).

Con base en estos fundamentos, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño, implementación y evaluación de un sistema acuapónico de bajo costo, integrado con energía solar y utilizando peces Plati, con el fin de comparar su rendimiento y sostenibilidad frente a dos métodos agrícolas convencionales: el cultivo en suelo con fertilización química y la hidroponía con solución nutritiva.

Se espera que el sistema acuapónico ofrezca ventajas competitivas en términos de eficiencia hídrica, reducción de insumos químicos, rendimiento de biomasa vegetal y autonomía energética. Asimismo, este prototipo busca aportar evidencia científica que respalde la viabilidad de la acuaponía como una estrategia para promover la seguridad alimentaria, la sostenibilidad agrícola y el empoderamiento comunitario, especialmente en contextos con recursos limitados. En última instancia, este enfoque podría contribuir al desarrollo de tecnologías apropiadas y replicables que fortalezcan los sistemas alimentarios locales en armonía con el medio ambiente, favoreciendo una transición agroecológica más justa, equitativa y resiliente.

TEORÍA

La acuaponía es una tecnología agrícola emergente que integra dos disciplinas: la acuicultura, o cría de organismos acuáticos en sistemas controlados, y la hidroponía, cultivo de plantas en soluciones nutritivas sin suelo. Esta simbiosis se basa en el aprovechamiento de los residuos metabólicos de los peces, principalmente amonio y urea, los cuales son convertidos por bacterias nitrificantes en formas nitrogenadas disponibles para las plantas, como nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). A su vez, las plantas absorben estos nutrientes y purifican el agua, que es recirculada al tanque de peces, cerrando así un ciclo ecológico eficiente (Goddek et al., 2015).

El modelo de acuaponía responde a principios de economía circular, maximizando el uso de los recursos disponibles y minimizando los desechos. No solo reduce el consumo de agua en más del 90% comparado con la agricultura convencional, sino que también evita la descarga de efluentes contaminantes en el ambiente, lo que lo convierte en un sistema ideal para zonas con escasez hídrica o limitada disponibilidad de suelo fértil (Rakocy et al., 2006). A diferencia de los cultivos en suelo, donde el lavado de nutrientes es una causa común de contaminación de mantos freáticos, la acuaponía recicla constantemente los nutrientes en un sistema cerrado.

Un sistema acuapónico básico está compuesto por al menos tres componentes principales: un tanque de cultivo de peces, un biofiltro y un lecho de cultivo vegetal. El biofiltro juega un papel crítico al albergar comunidades de bacterias nitrificantes, especialmente *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, responsables de transformar el amoníaco excretado por los peces en nitratos no tóxicos para ellos y aprovechables por las plantas. Para un funcionamiento óptimo, se requiere mantener parámetros fisicoquímicos estables como temperatura (20-28 °C), pH (6.5-7.5), oxígeno disuelto (>5 mg/L) y una relación adecuada entre la biomasa de peces y la superficie de cultivo (Somerville et al., 2014).

Existen diferentes configuraciones acuapónicas: medios de cultivo (media beds), sistemas de flujo profundo (DWC, por sus siglas en inglés) y de película nutritiva (NFT). En este proyecto se emplea un sistema con sustrato inerte, generalmente perlita o tezontle, que permite el anclaje de las raíces y actúa como medio adicional para el crecimiento microbiano. Este enfoque ofrece ventajas como mayor estabilidad térmica, filtración mecánica de sólidos y facilidad de manejo para cultivos frutales como la fresa.

La elección de las especies vegetales en acuaponía no es arbitraria, ya que se deben considerar factores como demanda nutricional, tolerancia a la humedad y capacidad de crecimiento en sistemas

hidropónicos. La fresa (*Fragaria ananassa*) ha sido ampliamente investigada en contextos hidropónicos debido a su alto valor comercial, demanda nutricional específica y adaptabilidad a sustratos inertes. Requiere niveles moderados de nitrógeno, potasio, calcio y fósforo, los cuales son generalmente bien suplidos en sistemas acuapónicos equilibrados (Resh, 2013). Además, su ciclo corto de producción permite obtener resultados experimentales en periodos menores a 90 días.

La albahaca (*Ocimum basilicum*) es una hierba aromática con alto contenido de compuestos bioactivos como eugenol, flavonoides y aceites esenciales. Tiene una alta tasa de absorción de nutrientes y es sensible a las condiciones de salinidad, lo que la convierte en un bioindicador eficaz para evaluar la calidad del agua. Su crecimiento vigoroso en sistemas hidropónicos y acuapónicos ha sido documentado en diversas investigaciones, demostrando mayor contenido de compuestos antioxidantes cuando se cultiva en sistemas sostenibles (Knaflewski et al., 2019).

El *Xiphophorus maculatus*, comúnmente conocido como Plati, es una especie de agua dulce nativa de Centroamérica, altamente valorada en acuicultura doméstica por su resistencia, fácil reproducción y comportamiento pacífico. A diferencia de especies comerciales como tilapia o bagre, los Plati presentan tasas de crecimiento moderadas y bajo requerimiento proteico, lo cual reduce el costo de alimentación y facilita su manejo en sistemas experimentales o educativos.

Son peces ovovivíparos, lo que implica que dan a luz crías vivas, permitiendo una rápida expansión poblacional dentro del sistema. Esto es ventajoso en prototipos de investigación donde la variación en biomasa puede ofrecer datos importantes sobre la dinámica del ecosistema. Además, su baja carga contaminante y mínima exigencia en espacio los convierte en una opción ideal para sistemas de pequeña escala o urbanos.

Uno de los desafíos en sistemas acuapónicos es el requerimiento constante de energía para mantener la recirculación del agua, oxigenación y control de temperatura. La integración de energía solar mediante paneles fotovoltaicos representa una solución sostenible, al reducir la dependencia de fuentes fósiles y permitir la instalación de sistemas autónomos en áreas rurales o sin acceso a la red eléctrica.

La energía solar fotovoltaica se basa en la conversión directa de la radiación solar en electricidad a través de celdas semiconductoras, generalmente de silicio. Su eficiencia ha mejorado significativamente en las últimas décadas, permitiendo la operación continua de bombas de agua, aireadores y sistemas de monitoreo con una inversión inicial accesible y bajo costo de mantenimiento. El aprovechamiento de la energía solar también contribuye a reducir la huella de carbono del sistema agrícola, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, especialmente los relacionados con energía limpia (ODS 7), producción responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13) (FAO, 2018).

Para evaluar objetivamente la eficiencia de la acuaponía, es necesario compararla con sistemas convencionales de producción vegetal: la hidroponía y el cultivo en suelo. En hidroponía, las plantas obtienen nutrientes de soluciones minerales preparadas artificialmente, lo que permite un control preciso de la nutrición, pero genera residuos líquidos con alta carga salina. Además, depende en gran medida de insumos industriales y energía eléctrica para su operación.

En contraste, el cultivo en suelo enfrenta limitaciones por la pérdida de fertilizantes por lixiviación, dependencia del clima, degradación del suelo y necesidad de pesticidas. Ambos modelos tienen implicaciones ambientales importantes, desde la contaminación del agua hasta la erosión de suelos y emisiones de gases de efecto invernadero. La acuaponía, al cerrar el ciclo de nutrientes y aprovechar residuos biológicos, representa un modelo más sostenible, especialmente cuando se combina con fuentes renovables de energía (Lennard & Leonard, 2006).

El uso de peces ornamentales o de bajo impacto como el Plati también permite el involucramiento de estudiantes, familias o emprendedores sin experiencia previa en acuicultura, disminuyendo las barreras técnicas y económicas para su adopción. Asimismo, la posibilidad de combinar múltiples cultivos y adaptar el sistema a diferentes escalas hace de la acuaponía una alternativa viable para diversificar la producción agrícola en un contexto de cambio climático y crisis de recursos.

PARTE EXPERIMENTAL

Evaluación y delimitación del terreno

Se identificó y seleccionó un terreno adecuado para la instalación del sistema acuapónico, considerando factores como orientación solar, disponibilidad de agua, acceso y espacio.

Figura 1. Terreno seleccionado

Preparación para la estructura

Se limpió, niveló y acondicionó el terreno para garantizar la correcta instalación de los componentes del sistema. Se construyó la base y soporte que sostendría las camas de cultivo donde se colocarán las plantas, usando materiales resistentes y de bajo costo.

Figura 2. Preparación del terreno

Figura 3. Terreno con estructura base

Fabricación e integración del caudal

Se diseñaron y fabricaron tubos de PVC, un material adecuado para permitir el flujo del agua desde el tanque de peces hacia las camas de cultivo y de regreso, asegurando un sistema cerrado y continuo, siguiendo la técnica de NFT. Se instalaron los tubos en la estructura previamente construida, asegurando una correcta inclinación y sellado para evitar fugas.

Figura 10. Fabricación según la técnica NTF

Figura 11. Incorporación a la estructura

Colocación de los paneles solares y accesorios

Se instalaron los paneles solares en una ubicación estratégica con máxima exposición al sol para alimentar eléctricamente la bomba de agua y el sistema de aireación. Se conectaron mangueras, filtros, bombas y otros accesorios necesarios para garantizar un flujo eficiente de agua y oxigenación.

Figura 6. Incorporación de paneles solares

Figura 12. Accesorios del sistema

Integración de los peces al sistema

Se introdujeron los peces *Plati* (*Xiphophorus maculatus*) en un tanque de 200 litros, comenzando el proceso de producción de desechos nitrogenados útiles para las plantas.

Figura 7. Incorporación de peces Plati

Situación de las diferentes semillas

Se sembraron las especies seleccionadas (*Fragaria ananassa* (fresa) y *Ocimum basilicum* (albahaca)) en la cama de cultivo con sustrato inerte.

Figura 13. Incorporación de semillas

Pruebas en sistema de nutrientes

Se implementó un sistema hidropónico paralelo como tratamiento comparativo, usando solución nutritiva estándar. Se estableció un tercer tratamiento con cultivo tradicional en suelo y fertilización química, como control.

Figura 9. Sistema hidropónico

Figura 14. Cultico tradicional

Medición de las plantas obtenidas

Durante 90 días, se monitoreó el crecimiento de las plantas (altura, número de hojas, peso fresco y seco), así como la calidad del agua y la salud de los peces.

Figura 151. Medición del crecimiento de la planta

Análisis mediante técnicas estadísticas

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente aleatorizado (BCA) con los tres tratamientos. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre grupos. Se aplicó la prueba de Tukey para comparar las medias de los tratamientos con una significancia estadística ($p < 0.05$).

Ecuación 7. Método BCA

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij} = Valor\ observado\ de\ la\ variable\ dependiente\ para\ el\ tratamiento\ i\ en\ el\ bloque\ j.$
$\mu = Media\ general.$
$T_i = Efecto\ del\ tratamiento\ i.$
$\beta_j = Efecto\ del\ bloque\ j.$
$\epsilon_{ij} = Error\ aleatorio\ asociado\ a\ cada\ observación\ (asumido\ normal\ e\ independiente).$

Ecuación 8. Método ANNOVA

$$F = \frac{CM_{Tratamiento}}{CM_{Error}}$$

Ecuación 9. Método Tukey

$$HSD = q_{\alpha,t,df_{Error}} \times \sqrt{\frac{CM_{Error}}{r}}$$

Donde:

HSD = Diferencia minijma significativa
$q_{\alpha,t,df_{Error}}$ = Valor crítico de la distribución.
CM_{Error} =Cuadrado medio del error obtenido en ANOVA.

r = Número de repeticiones por tratamiento

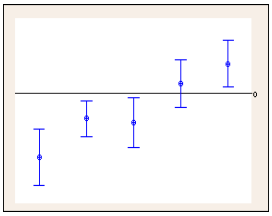


Figura 12. Fusión estadística

RESULTADOS

Calidad del Agua en el Sistema Acuapónico

Los parámetros promedio registrados en el sistema acuapónico con peces *Plati (Xiphophorus maculatus)* durante el experimento fueron:

Tabla 1. Resultados Obtenidos de la Calidad del Agua

Parámetro	Valor Promedio
pH	7.2
Temperatura (°C)	25.5
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6.8
Nitratos (mg/L)	35.0

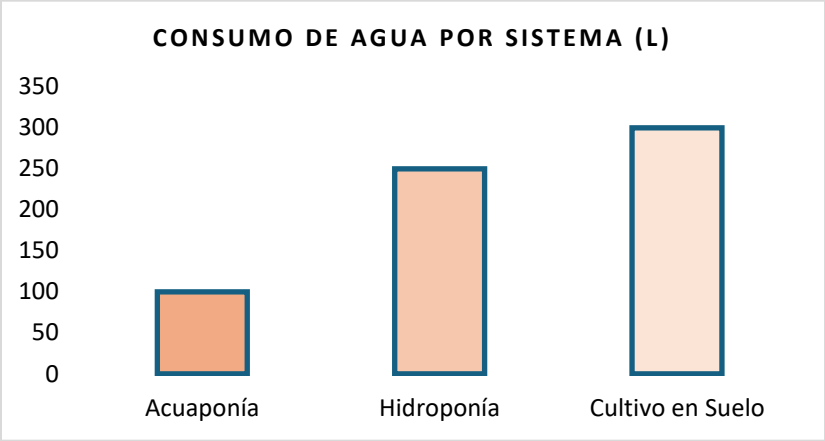
Interpretación:

- Estos valores se encuentran dentro de los rangos óptimos tanto para peces como para el cultivo de plantas, asegurando un entorno estable y no tóxico.
- El contenido de nitratos adecuado indica una conversión eficiente de los desechos de los peces en nutrientes disponibles para las plantas, reflejando un buen desempeño del biofiltro.

Consumo de Agua por Sistema (L)

Interpretación:

- La acuaponía utilizó menos del 30% del agua que requiere el cultivo en suelo, demostrando una altísima eficiencia hídrica.
- Este bajo consumo se debe al recirculado continuo del agua y su uso compartido entre peces y plantas, sin pérdidas por lixiviación ni evaporación excesiva.

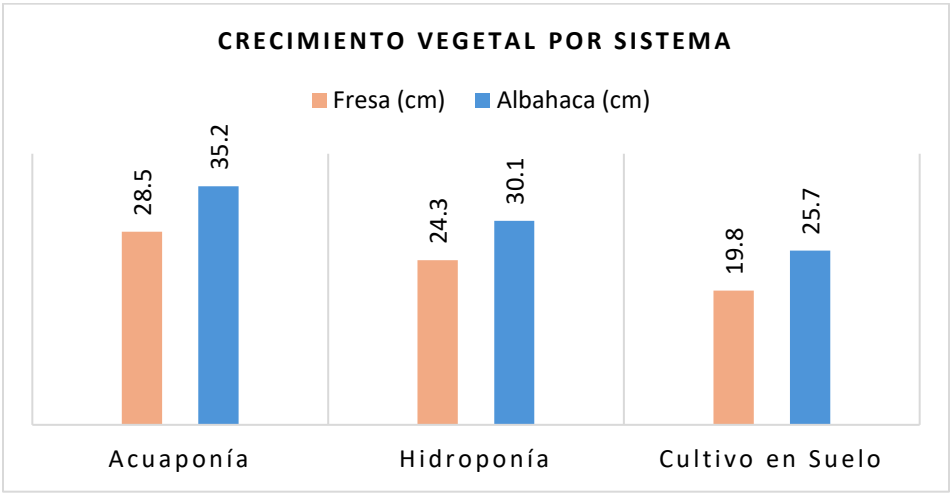


Gráfica 1. Consumo de Agua por Sistema

Crecimiento Vegetal por Sistema

Interpretación*:*

- El sistema acuapónico mostró el mayor crecimiento promedio tanto en fresa como en albahaca.
- Las plantas cultivadas en acuaponía alcanzaron su punto de cosecha antes que en los otros dos sistemas.
- Esto indica una mejor absorción de nutrientes y un entorno más equilibrado para el desarrollo vegetal.



Gráfica 2. Crecimiento Vegetal por Sistema

Resultados del Análisis Estadístico (ANOVA y Tukey)

Se realizó un análisis ANOVA unidireccional para comparar el crecimiento vegetal (altura en cm) entre los tres sistemas de cultivo. Posteriormente se aplicó la prueba de Tukey para diferencias múltiples.

Resultados clave:

- Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento tanto de fresa como de albahaca entre los tratamientos ($p < 0.05$).
- La prueba de Tukey confirmó que el sistema acuapónico fue significativamente superior a los demás sistemas en ambas especies vegetales.
- La acuaponía mostró el mejor rendimiento vegetal con diferencias significativas frente a los otros sistemas.

Salud de los Peces

- La población de *Xiphophorus maculatus* aumentó constantemente.
- No se observaron signos de estrés, enfermedades ni mortalidad significativa.
- Esto indica un equilibrio adecuado entre la biocarga del sistema y el filtrado biológico, validando la compatibilidad entre el bienestar animal y la producción vegetal.

Sostenibilidad Energética

- Se utilizó energía solar para alimentar la bomba de agua y el aireador del sistema acuapónico.
- No se reportaron interrupciones en el funcionamiento, demostrando la eficiencia energética del sistema.
- Esto reduce el uso de electricidad convencional, disminuyendo la huella ambiental del prototipo.

Impacto Ambiental y Social

- El prototipo demuestra viabilidad para ser implementado en comunidades de bajos recursos.
- Su bajo consumo de agua, autosuficiencia energética y capacidad de producción dual (peces + plantas) lo hacen ideal para entornos rurales y urbanos.
- Representa una herramienta pedagógica valiosa para promover la educación ambiental y el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió evaluar de manera integral el rendimiento del sistema acuapónico que combina el cultivo de peces *Xiphophorus maculatus* y plantas comestibles (fresa y albahaca) en un entorno controlado, comparándolo con los métodos tradicionales de hidroponía y cultivo en suelo. Los resultados obtenidos evidencian de forma concluyente que la acuaponía no solo es un sistema viable para la producción sustentable de alimentos, sino que además ofrece ventajas significativas en eficiencia hídrica, crecimiento vegetal, estabilidad ecológica y potencial de implementación comunitaria.

Desde el punto de vista agronómico, se observó un crecimiento vegetal superior en el sistema acuapónico, tanto en fresa como en albahaca. En particular, las plantas cultivadas en acuaponía alcanzaron mayores alturas en menor tiempo en comparación con los otros dos métodos. Esto puede atribuirse a una combinación de factores como la disponibilidad constante de nutrientes (especialmente nitrógeno en forma de nitratos), la oxigenación adecuada del sistema radicular y la estabilidad de los parámetros fisicoquímicos del agua. Los valores promedio de pH (7.2), oxígeno disuelto (6.8 mg/L), temperatura (25.5 °C) y concentración de nitratos (35 mg/L) se mantuvieron

dentro de los rangos óptimos para la actividad metabólica tanto de peces como de plantas, lo cual favorece una simbiosis efectiva.

El análisis estadístico, mediante ANOVA unidireccional, confirmó que las diferencias en crecimiento vegetal entre sistemas fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). La prueba de comparaciones múltiples de Tukey reveló que el sistema acuapónico fue significativamente más eficiente en términos de crecimiento que tanto la hidroponía como el cultivo en suelo. Esta diferencia es especialmente relevante cuando se considera que el sistema acuapónico utilizó considerablemente menos agua, únicamente 25 L en comparación con los 60 L en hidroponía y 85 L en cultivo tradicional; demostrando una eficiencia hídrica sobresaliente. Esta característica convierte a la acuaponía en una alternativa ideal para regiones con estrés hídrico o acceso limitado al agua.

Desde la perspectiva zootécnica, la salud y bienestar de la especie *Xiphophorus maculatus* fueron óptimos durante toda la duración del experimento. No se detectaron signos de estrés, enfermedades ni mortalidad relevante, y la población presentó un crecimiento constante. Esto sugiere que el sistema de filtrado biológico, basado en biofiltración por bacterias nitrificantes, funcionó adecuadamente, manteniendo el equilibrio nitrogenado y evitando la acumulación de amoníaco y nitritos tóxicos. La coexistencia armoniosa entre peces y plantas muestra que el sistema acuapónico puede alcanzar un estado de homeostasis biológica eficiente, sin requerir insumos químicos ni fertilizantes adicionales.

En cuanto al consumo energético, el sistema se alimentó exclusivamente con energía solar a través de paneles fotovoltaico, lo que permitió mantener la bomba de recirculación y el aireador en funcionamiento continuo. La autonomía energética alcanzada elimina la dependencia de la red eléctrica y disminuye de forma considerable la huella de carbono del sistema. Este aspecto reviste especial importancia en comunidades rurales o con acceso limitado a infraestructura eléctrica, y demuestra el potencial de la acuaponía como herramienta de soberanía alimentaria con enfoque sustentable.

Otro elemento relevante es la aplicabilidad social y educativa del sistema. La implementación de este tipo de tecnologías en instituciones educativas, centros comunitarios o zonas rurales puede no solo mejorar el acceso a alimentos frescos, sino también fomentar la participación de las comunidades en el cuidado del medio ambiente, el aprendizaje científico y el desarrollo de habilidades técnicas. El sistema acuapónico representa una alternativa sustentable, replicable y adaptable a diferentes escalas, desde pequeñas unidades familiares hasta sistemas semiindustriales.

A nivel ambiental, la acuaponía minimiza los impactos negativos asociados a la agricultura convencional, como el uso excesivo de agroquímicos, la contaminación de cuerpos de agua, la degradación del suelo y el desperdicio hídrico. Al recircular el agua constantemente y evitar la lixiviación de nutrientes, el sistema actúa como un circuito cerrado, eficiente y respetuoso del entorno. Además, el uso de nitrógeno derivado de los residuos metabólicos de los peces evita la necesidad de fertilizantes sintéticos, reduciendo tanto los costos como la contaminación ambiental.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que la acuaponía con *Xiphophorus maculatus* es una alternativa agroecológica de alto valor para enfrentar los retos actuales en la producción de alimentos: escasez de agua, inseguridad alimentaria, presión ambiental y necesidad de sostenibilidad. La sinergia entre acuicultura y agricultura en un sistema bien equilibrado no solo incrementa el rendimiento por unidad de recurso, sino que también diversifica la producción y reduce la vulnerabilidad ante factores externos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., & Villarroel, M. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, *2*(2), 17–20. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57

2. Cerón, A., & Blanco, D. (2020). Sistema acuapónico como alternativa sostenible para el cultivo de hortalizas. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, *5*(1), 34–42.
3. Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (Eds.). (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6
4. Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, *246*(1–3), 147–156. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048
5. Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Gräber, J., Mellor, S., Schütz, T., ... & Wuertz, S. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquacultural Engineering*, *66*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.02.007
6. Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, *435*, 67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023
7. Martínez, A., & Ramírez, R. (2018). Análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey para la comparación de tratamientos en ensayos agronómicos. *Revista de Estadística Aplicada*, *10*(1), 23–35.
8. Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center. https://srac.tamu.edu/
9. Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th ed.). CRC Press.
10. Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf

EFECTO DEL RESVERATROL SOBRE EL BALANCE REDOX EN EMBRIONES PARTENOGENÉTICOS DE OVINO

Viridiana Ramírez Cruz[1], José Roberto Vázquez Avendaño[2], Alfredo Trejo Córdova[2], Demetrio Alonso Ambriz García[2], María del Carmen Navarro Maldonado[2]*

[1]Licenciatura en Biología, [2]Departamento de Biología de la Reproducción, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco Núm. 186, Col. Leyes de Reforma 1ª Sección, Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09310, CDMX.
carmennavarro2006@yahoo.com.mx

RESUMEN

A través de las biotecnologías reproductivas se pretende obtener mayor cantidad y calidad de embriones producidos *in vitro*, para el avance genético. En condiciones de laboratorio, los gametos y embriones son manipulados durante su utilización en biotecnologías tales como: maduración *in vitro* (MIV) y activación química de ovocitos, fertilización *in vitro* (FIV), transferencia nuclear de células somáticas (TNCS) y desarrollo embrionario *in vitro* (DIV), que afectan la calidad embrionaria por la concentración atmosférica de oxígeno y el estrés oxidativo, lo que provoca un aumento de especies reactivas de oxígeno (ERO) que dañan gametos y embriones. Es por ello que, para protegerlos, en los cultivos se ha implementado el uso de antioxidantes como el resveratrol. Esto favorece la generación de glutatión reducido (GSH), que es la defensa no enzimática principal de las células contra el estrés oxidativo. Por lo que este trabajo tuvo el objetivo de tratar ovocitos de ovino con resveratrol durante la MIV, evaluando su efecto en el DIV de embriones partenogenéticos. Para ello, se colectaron ovocitos a partir de ovarios de borregas sacrificadas en un rastro local. La MIV se efectuó por 20-22h en TCM-199 suplementado con hormonas (FSH y LH) y factor de crecimiento epidérmico (EGF), dividiéndolos en grupo control (GC= 0 µM) y grupo experimental (GE= 1 µM de resveratrol), e incubándolos a 38.5°C y 5% de CO_2 a humedad relativa alta. Los ovocitos madurados fueron activados con ionóforo de Ca^{2+} por 5 min y con 6-Dimetilaminopurina por 4 h. Los embriones partenogenéticos así formados, se cultivaron durante 168 h en medio de DIV a las condiciones descritas. Los blastocistos obtenidos se tiñeron con Diclorofluorosceína para determinar la presencia de ERO y con Cell Tracker Blue para GSH. Se tomaron fotografías de los embriones, que se analizaron en el programa ImageJ para determinar, semi cuantitativamente, los niveles de ERO y GSH. Los resultados mostraron un efecto positivo del resveratrol a 1 µM (GE), sobre las tasas de blastocistos (52% vs 44%, respectivamente). Respecto a la intensidad de fluorescencia para ERO y GSH, no se encontraron diferencias entre grupos (102.7±9.8 y 137.6±17.2 vs. 100.7±3.3 y 137.5±8.8, respectivamente, $p>0.05$). Se concluye que el resveratrol ejerció un efecto positivo en el DIV en embriones partenogenéticos de ovino a pesar de que el balance redox fue similar al control, quizá atribuible a la acción de la regulación génica que el resveratrol ejerce sobre el embrión.

Agradecemos a Rectoría General de la UAM y al CONAHCyT (hoy SECIHTI), por los fondos otorgados para el desarrollo del proyecto de base tecnológica en proceso de maduración, y del proyecto de ciencia básica y de frontera C-459/2024, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

El uso de biotecnologías reproductivas es de suma importancia cuando se busca lograr tanto cantidad como calidad embrionaria. Una de estas biotecnologías es la producción de embriones *in vitro*, que se emplea a nivel mundial debido a sus aplicaciones en la mejora genética (Portocarrero *et al.*, 2020). Se han recopilado evidencias que sugieren que el potencial de desarrollo de los embriones *in vitro* está directamente relacionado con la calidad del ovocito del que se derivan (Corrêa *et al.*, 2008). En condiciones fisiológicas, los gametos femeninos y masculinos, y los embriones, crecen y se desarrollan en un ambiente protector, como el ovario, el testículo y el tracto reproductivo femenino, respectivamente (Torres-Osorio *et al.*, 2019). Sin embargo, en condiciones de laboratorio,

los gametos y embriones son manipulados durante la maduración *in vitro* (MIV), la activación o fertilización *in vitro* (FIV), y el desarrollo embrionario *in vitro* (DIV). Existen varios factores que afectan la calidad embrionaria, incluyendo la concentración de oxígeno, la exposición a la luz, los cambios de pH, la composición de los medios de cultivo y los suplementos proteicos, así como el estrés oxidativo, que provoca un aumento de especies reactivas de oxígeno (ERO), las cuales dañan lípidos, ácidos nucleicos y proteínas celulares (Vásquez *et al.*, 2014).

Por otro lado, el metabolismo normal y las funciones que mantienen el equilibrio requieren niveles bajos de sustancias oxidantes. Por esta razón, las concentraciones normales de radicales libres son esenciales para facilitar procesos como la capacitación y la hiperactivación del espermatozoide, la fertilización y el desarrollo del embrión (Zhong y Zhou, 2013). En contraste, el estrés oxidativo se refiere a un desequilibrio en el que predominan los oxidantes sobre los antioxidantes, lo que puede tener efectos perjudiciales en los gametos y embriones (Sies, 2020). Las especies reactivas de oxígeno son moléculas que se generan a partir de la reducción del oxígeno. La mayoría de ellas contienen radicales libres, que son moléculas con un número impar de electrones de valencia, lo que significa que tienen electrones no apareados y por lo tanto reaccionan con otras moléculas, desestabilizándolas. Entre las ERO más destacadas se encuentran el superóxido (O_2), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el hidróxido (OH) (Zhong y Zhou, 2013).

Además, las células poseen mecanismos de defensa conocidos como sistemas antioxidantes, responsables de mantener el equilibrio en las reacciones de óxido-reducción y garantizar la supervivencia celular. Estos sistemas se dividen en dos categorías: exógenos, que se obtienen de la dieta, como la vitamina E, el betacaroteno, los flavonoides y el licopeno (Mayor, 2010), y endógenos, que se producen internamente a través de la síntesis celular. A su vez, los antioxidantes endógenos se clasifican en enzimáticos, que incluyen a las enzimas superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa, tiorredoxina (TRX), peroxirredoxina, catalasa, glutatión reductasa (GRx), glutarredoxina y tiorredoxina reductasa (TrxR); y los antioxidantes endógenos no enzimáticos como el glutatión reducido (GSH), la mioglobina, las metalotioneínas y la coenzima Q (Guija y Guija, 2023). De tal manera que se ha estudiado la implementación de antioxidantes en las biotecnologías reproductivas. El resveratrol (trans-3,4,5-trihidroxiestilbeno) que posee una estructura básica de dos anillos fenólicos unidos entre sí mediante un doble enlace de estireno, es un compuesto polifenólico que producen las plantas como respuesta al estrés, se clasifica como fitoestrógeno y se encuentra en alimentos como el vino tinto, uvas, pistaches, nueces, cacahuetes y moras, así como en algunas plantas como *Polygonum cuspidatum* (Sáenz *et al*., 2014). Posee un peso molecular de 228.25 g/mol, entre sus propiedades en estudios *in vitro,* destaca su capacidad como anticancerígeno, como antiagregante plaquetario, y por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antialérgicas (Gambin *et al.*, 2013). Dentro de la reproducción asistida, el resveratrol ha sido empleado en diferentes especies animales, como bovinos, ovinos y roedores, por mencionar algunas, aprovechando sus beneficios en la MIV de ovocitos empleados para la FIV, para la clonación de embriones por transferencia nuclear de células somáticas (TNCS) y otras técnicas en donde se busca un aumento en la tasa de maduración, de fertilización y desarrollo embrionario (Yang *et al*., 2021).

TEORÍA

En condiciones *in vivo*, durante la maduración de los ovocitos y el desarrollo embrionario, la tensión de oxígeno en el líquido folicular disminuye de manera constante. Cerca de la ovulación, se reduce el flujo sanguíneo hacia el ovario, lo que expone al ovocito a niveles de oxígeno cada vez más bajos, desde la etapa de folículo primario hasta el momento de la ovulación. Además, la tensión de oxígeno disminuye a lo largo del oviducto, donde se lleva a cabo la fertilización (aproximadamente en un 8%), y hasta el útero (alrededor de un 2%) durante la formación e implantación del blastocisto. En estas condiciones, se generan las ERO, que a veces se producen en niveles necesarios para el desarrollo (Hardy *et al.*, 2021). Sin embargo, se considera que, durante el desarrollo embrionario previo a la implantación, las mitocondrias del embrión sufren cambios significativos en su forma y ubicación, donde el potencial de membrana mitocondrial es fundamental para la producción de ATP, y se ha

demostrado que, en embriones de 2 células, tiene un impacto positivo en su desarrollo (Acton *et al.,* 2004).
Por otro lado, los embriones desarrollados *in vitro* enfrentan diversos tipos de estrés, debido a la manipulación y a factores relacionados con las condiciones del cultivo, lo que puede dar lugar a la presencia de ERO. Por ello, en las primeras etapas del desarrollo los embriones son especialmente susceptibles a estos factores, lo que puede resultar en un bajo potencial de desarrollo y una menor calidad embrionaria (Crasta *et al.*, 2023).

El glutatión reducido (GSH) juega un papel crucial en la síntesis de ADN y proteínas, y es fundamental en el metabolismo. Se considera la principal defensa no enzimática de las células contra el estrés oxidativo, ya que actúa como sustrato de la enzima GPX, que se encarga de eliminar el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los hidroperóxidos de lípidos (Rausell y Tarín, 2005). Además, se ha reportado que en murino y bovino, el GSH está presente durante todo el desarrollo preimplantatorio de los embriones, desempeñando un papel central en la defensa contra la oxidación celular, al reducir las ERO y mantener una adecuada concentración intracelular de GSH (Harvey *et al.,* 1995). No obstante, existe interés por proponer alternativas que disminuyan el estrés oxidativo para obtener gametos de mejor calidad y con el potencial de generar embriones viables en sistemas *in vitro*. El resveratrol, por su efecto antioxidante, ha sido utilizado en diferentes concentraciones en estudios de diversas especies. Se ha reportado que el tratamiento con resveratrol a una concentración de 1 µM en ovocitos desvitrificados, mejora la supervivencia, la MIV y el potencial de membrana mitocondrial, pero no mejora el desarrollo de los embriones a la etapa de blastocisto después de la activación partenogenética (Ito *et al*., 2020). En ovino, se demostró que la tasa de MIV fue similar en los ovocitos tratados con 0.5 y 1 µM de resveratrol, y superior a los tratados con 0 y 0.25 µM, la tasa de DIV también fue similar para 0.5 y 1 µM de resveratrol y mayor que para 0 y 0.25 µM (González-Garzón *et al.*, 2023). Asimismo, ovocitos tratados durante la MIV con 1 µM de resveratrol y utilizados para FIV, resultaron en niveles más bajos de ERO en los blastocistos producidos sin diferencias en los niveles de glutatión (GSH) (González-Garzón *et al*., 2023). Por otra parte, Liu *et al*. (2018), demostraron que a 1 µM el resveratrol promueve la MIV de ovocitos y la tasa de blastocistos en ratonas mayores. También encontraron que la calidad de los ovocitos estaba asociada con un aumento en la expresión de los genes Sirt1, Cat, Sod1 y Gpx4. Genes cuyos roles son clave en la regulación del desarrollo embrionario, particularmente en la protección contra el estrés oxidativo (Meng *et al.*, 2018). El gen Sirt1 regula la proliferación, la diferenciación celular y la apoptosis (Zhou *et al.*, 2016). La catalasa (Cat), es una enzima antioxidante que descompone el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, protegiendo así a las células de los efectos dañinos del estrés oxidativo (Lee *et al.*, 2001). La superóxido dismutasa 1 (Sod1) es otra enzima antioxidante esencial, implicada en la regulación de la división celular, la migración celular y la formación de tejidos (Finkel *et al.,* 2000). Por último, el gen Gpx4 codifica una enzima antioxidante crucial que reduce los hidroperóxidos lipídicos, protegiendo las membranas celulares del daño causado por el estrés oxidativo (Xie *et al.,* 2016).

Con la finalidad de determinar si la capacidad del ovocito para desarrollar un embrión se veía afectada por el resveratrol, en este trabajo se trataron con este antioxidante ovocitos de ovino doméstico (*O. aries*) durante la MIV, determinando el balance redox, la calidad y la tasa de DIV en embriones partenogenéticos.

PARTE EXPERIMENTAL

Todos los reactivos utilizados se adquirieron de Sigma-Aldrich®, a menos que se indique lo contrario.

Colecta de ovocitos

Con base en la metodología descrita por Martínez *et al*. (2019), se colectaron ovarios de ovejas en un rastro ubicado en el Estado de México. Éstos se transportaron al laboratorio durante 90 minutos dentro de un termo con solución salina (NaCl al 0.9% y 1% de antibióticos-antimicóticos Antibac-Antifun, In Vitro, SA. CDMX, México) a una temperatura de 28-35°C. Una vez en el laboratorio, los ovarios se lavaron tres veces en solución salina. Posteriormente, los ovocitos se colectaron mediante

punción y aspiración de los folículos ováricos con una jeringa estéril de 10 mL y aguja calibre 20, en 1 mL de medio de colecta a base de TCM-199 con HEPES (25 mM/mL, In Vitro, S.A., CDMX, México) y heparina (0.3mg/mL), a 38°C. Los ovocitos colectados se seleccionaron con base en su morfología (ASEBIR, 2015). Finalmente, se lavaron en gotas de medio de maduración in vitro (MIV), a base de TCM-199 (In Vitro, S.A., CDMX, México) suplementado con 10% de suero de ternera recién nacida NCS (Biowest, Nuaillé,Francia), 10 ng/mL de factor de crecimiento epidérmico (EGF), 0.1 UI/mL de hormona folículo estimulante (FSH, Gonal-F Merck, Darmstadt, Alemania), 5 UI/mL de hormona gonadotropina coriónica equina (eCG, GonaforteParfarm S.A., CDMX, México), y 0.65% de antibióticos y antimicóticos (Antibac-Antifun, In Vitro, SA. CDMX, México).

Maduración *in vitro* de ovocitos tratados con Resveratrol

Para la MIV, los ovocitos se dividieron equitativamente en dos grupos según sus tratamientos (Grupo control GC= 0 µM, grupo experimental GE= 1 µM de resveratrol), los cuales fueron cultivados en cajas de cuatro pozos (Nunc, ThermoFisher Scientific, Waltham MA, USA) con 500 µL de medio de MIV, cubiertos con 300 µL de aceite mineral e incubados de 20 a 22 h a 38.5°C, 5% de CO2 y humedad relativa alta (Robledo-Verduzco *et al*., 2009). Previo a su uso, el resveratrol se disolvió en dimetil sulfoxido (DMSO) para una solución stock de 50 µM (Mukherjee *et al.*,2014).

Evaluación de la maduración *in vitro*

Una vez transcurrido el tiempo de MIV, se seleccionaron los ovocitos de cada grupo tratado que presentaron expansión de las células del cúmulo. Luego, se eliminaron tales células mediante incubación en hialuronidasa (0.5 mg/mL) durante 8 min, pipeteando cuidadosamente con una micropipeta ajustada a 200 µL y se seleccionaron los ovocitos con presencia del primer cuerpo polar (ASEBIR, 2015).

Activación de embriones partenogenéticos

En una caja de 4 pozos (Nunc, Thermo Fisher Scientific, Waltham MA, USA) se depositaron los ovocitos en MII (Metafase II) de cada grupo en 1 mL de T2 (TCM 199 con Hepes con 2% de NCS (Biowest, Nuaillé, Francia) y 8 µL de ionóforo de Ca^{2+} durante 5 min. Después se lavaron tres veces en 1 mL de T20 (TCM 199 con Hepes y 20% de NCS) durante 3 min cada uno y se depositaron en gotas de 100 µL con 6-Dimetilaminopurina (6-DMAP) para su activación, incubándolos a las mismas condiciones descritas durante 46 h. Una vez transcurrido el tiempo, se hicieron 3 lavados de 3 min cada uno en gotas de medio de desarrollo embrionario (IVF Bioscience, Cornwall, United Kingdom) y finalmente se cultivaron en una caja de 4 pozos (Nunc, Thermo Fisher Scientific, Waltham MA, USA) con 100 µL del mismo medio a las mismas condiciones descritas, para el desarrollo de los embriones partenogenéticos (Vajta *et al*., 2006; Mukherjeeet *et al.*, 2014).

Evaluación del desarrollo embrionario *in vitro*

Después de 96 h de cultivo, los embriones partenogenéticos de *O. aries* se evaluaron bajo microscopio invertido y se contabilizó la tasa de segmentación embrionaria, obteniendo así el porcentaje de desarrollo *in vitro* (DIV) correspondiente. A las 168 h, se obtuvo la tasa de embriones partenogenéticos que alcanzaron las etapas de mórula y blastocisto en cada grupo tratado.

Evaluación del balance redox en embriones partenogenéticos

Los embriones partenogenéticos de ovino se tiñeron de sus núcleos para contabilizar el número de blastómeros presentes. Para ello, se lavaron en gotas de 100 µL de PBS (In Vitro S.A., CDMX, México). A continuación, se fijaron en una gota de 100 µL de paraformaldehído al 4%, se realizó otro lavado y se colocaron en una gota de DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol, diclorhidrato) durante un minuto. Posteriormente, se realizaron dos lavados en PBS.

Para determinar la presencia y los niveles de ERO y GSH, se agregó 1 µL de diacetato de 2,7-diclorofluoresceína (DCFH-DA, Invitrogen, Eugene Oregon, EUA) y 1 µL de diacetato de 5-7-clorometilfluoresceína (CMFDA, Cell Traker Blue, Thermo fisher scientific) en la caja de DIV, cultivando a mismas condiciones descritas por 30 min. Luego se fijaron en paraformaldehído al 4% durante 10 min y se lavaron dos veces en 100 µL de DPBS (In Vitro, S.A., CDMX, México).

Para el montaje, los embriones se colocaron en portaobjetos en cámara húmeda, se deshidrataron y se añadieron 15 µL de solución de montaje (IMACEL, In Vitro S.A., CDMX, México). Se cubrieron con un cubreobjetos y se sellaron con esmalte de uñas. Para determinar cualitativamente los niveles de ERO, GSH y núcleos, los embriones partenogenéticos de ovino se observaron bajo un microscopio de epifluorescencia con un filtro UV de 460 nm para ERO y de 405 nm y para GSH. Posteriormente, se tomaron fotografías y se determinó semi cuantitativamente la intensidad de la fluorescencia y la cantidad de núcleos con el software ImageJ (Versión 1.41; National Institute of Health, Bethesda, MD, EUA) para evaluar el balance redox en los embriones partenogenéticos de ovino (Kwak *et al*., 2012; Mukherjeeet *et al.*, 2014).

RESULTADOS

No se encontraron diferencias entre grupos en la intensidad de fluorescencia para ERO y GSH (102.7±9.8 y 137.6±17.2 vs 100.7±3.3 y 137.5±8.8, respectivamente p>0.05). Se concluye que el resveratrol ejerció un efecto positivo en la MIV y el DIV en embriones partenogenéticos de ovino si se maduran en presencia de resveratrol (1 µM) a pesar de que el balance REDOX fue similar con el control, quizá atribuible a la acción de regulación génica que tiene el resveratrol sobre el embrión.

Efecto del resveratrol en la tasa de maduración

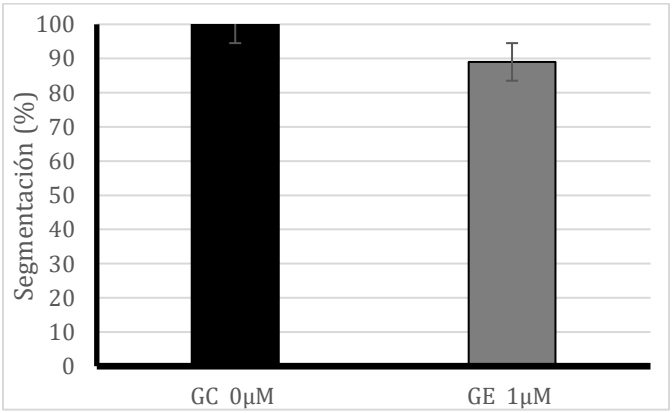
En el GE se observó un efecto positivo con el resveratrol, es decir, mostró un mayor porcentaje (67.85 %) con respecto a la MIV en comparación con el GC (32.14%) (Tabla 1).

Estado	GC 0µM N(%)	GE 1µM N(%)
Madurados	9 (32.14)	19 (67.85)
No Madurados	2 (7.14)	0 (0)
Dañados	13 (46.42)	7 (25)

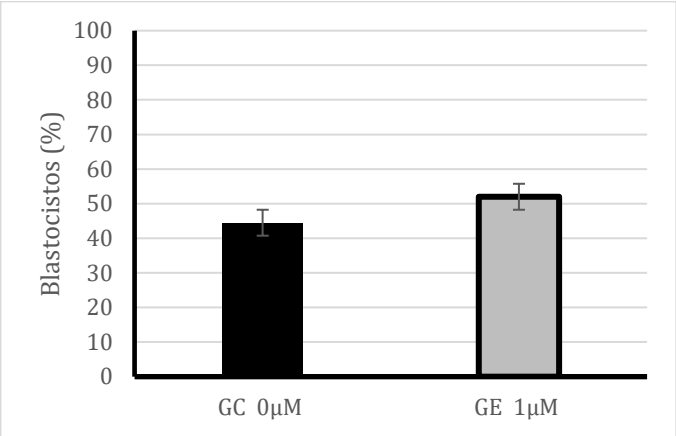
Tabla 1. Porcentaje de maduración in vitro de ovocitos de ovino con resveratrol.
Donde se consideró una N= 28 para cada grupo.

Efecto del resveratrol en la tasa de desarrollo embrionario

Después de las 98 horas de cultivo todos los embriones del GC segmentaron; mientras que en el GE hubo un 89% de segmentación (Gráfica 1). Sin embargo, pasadas las 168 horas de cultivo el GC mostró un menor porcentaje de blastocistos (44.44%) en comparación con el GE (52%) a pesar de haber tenido un mayor porcentaje de segmentación (Gráfica 2).



Gráfica 1. Porcentaje de segmentación de embriones partenogenéticos de ovino con resveratrol después de las 98 h de cultivo.



Gráfica 2. Porcentaje de blastocistos en embriones partenogenéticos de ovino con resveratrol después de 168 h de cultivo.

Efecto del resveratrol en el balance redox

No se observaron diferencias significativas de ERO y GSH, los valores obtenidos fueron similares entre los diferentes grupos. Para ERO, los valores de fluorescencia fueron 100.7 ± 3.3 y 102.7 ± 9.8 para GC y GE respectivamente, mientras que para GSH, fueron 137.5 ± 8.8 y 137.6 ± 17.2 en los respectivos grupos (Figura 1).

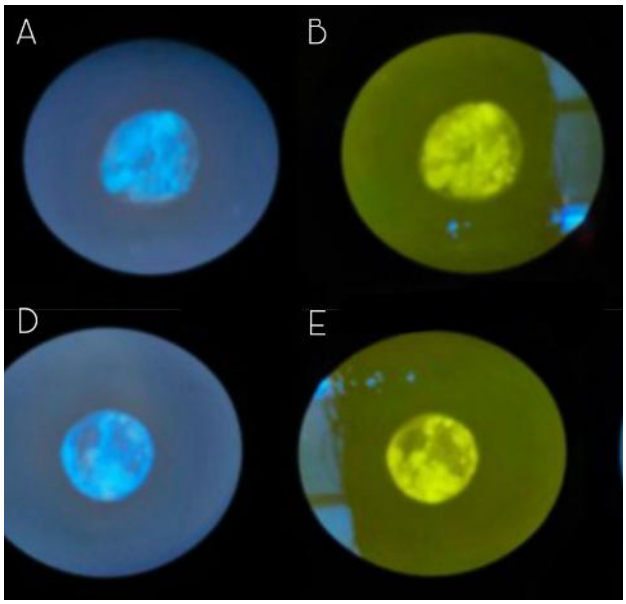


Figura 1. Presencia de GSH (A y D) y ERO (B y E) en embriones partenogenéticos de ovino con resveratrol durante la MIV, en campo oscuro y aumento de 40x. En donde: A y B corresponden al GC (0 µM). D y E al GE (1µM).

DISCUSIÓN

El éxito de la producción in vitro de embriones depende de varios factores, siendo uno de los más relevantes los niveles adecuados de ERO (Torres-Osorio et al., 2019). Aunque la maduración del

ovocito es un proceso altamente coordinado y complejo que le permite adquirir la competencia necesaria para ser fecundado, también constituye el primer paso crucial que determina el éxito en la producción de embriones mediante técnicas *in vitro* (Gilchrist, 2011). Durante la foliculogénesis, la concentración de oxígeno en el líquido folicular disminuye progresivamente hasta la ovulación, alcanzando niveles bajos durante la fertilización y la implantación del blastocisto. En este contexto, se generan ERO, que son esenciales, en dosis controladas, para el desarrollo, manteniéndose equilibradas por el entorno materno y el ovocito en maduración. Sin embargo, en las técnicas de reproducción asistida, los medios de cultivo son más básicos que el ambiente natural, y contienen componentes como lactato, piruvato, glucosa y HEPES. Además, el suero o la albúmina sérica favorecen el desarrollo embrionario, pero también aumentan la producción de ERO (Hardy et al., 2021). Estas diferencias entre el entorno *in vivo* e *in vitro* representan un reto significativo para la reproducción asistida.

Los antioxidantes han destacado por su capacidad para prevenir la oxidación, gracias a sus diversas funciones y propiedades. Esto ha impulsado su estudio a lo largo de los años y los ha convertido en una opción para mejorar la calidad de gametos y embriones, debido a su bajo costo y la amplia disponibilidad de compuestos de origen natural. En la literatura se han reportado distintos estudios en diversas especies, como la porcina, bovina y caprina, entre otras, sobre el uso del resveratrol en los ovocitos para aumentar la concentración de GSH, reducir la producción de ERO y mejorar la tasa de maduración y la formación de blastocistos (Torres-Osorio et al., 2019). Según los estudios de Wang et al. (2014) y Kwak et al. (2012), el resveratrol mostró efectos positivos sobre la MIV de ovocitos bovinos y porcinos, aumentando significativamente las tasas de maduración a concentraciones específicas (1.0 µM en el caso de Wang et al., 2014). En el presente estudio, aunque se observó una ligera tendencia hacia un mayor porcentaje de maduración en el grupo con resveratrol (GE) en comparación con el GC, estas diferencias no fueron significativas, resultados consistentes con los del estudio de Wang et al. (2014), en el que, aunque el resveratrol promovió la expansión de las células del cúmulo y la expulsión de cuerpos polares, la mejora en la tasa de maduración no fue estadísticamente significativa. Por otro lado, en la segmentación de los embriones partenogenéticos, la investigación de Portocarrero et al. (2020) evidenció una mejora considerable en la segmentación de embriones bovinos tratados con resveratrol, especialmente a concentraciones de 0.5 µM. Sin embargo, en el presente estudio, la tasa de segmentación en el GC fue notablemente alta (100%), y aunque el grupo con resveratrol mostró una tasa de segmentación más baja, no se observó una diferencia significativa. No obstante, estas variaciones podrían indicar que el resveratrol no tiene un efecto claro y consistente sobre la segmentación embrionaria en ovinos, lo cual podría atribuirse a la especie o a la concentración utilizada. En cuanto a la producción de ERO, la literatura señala que el resveratrol puede reducir considerablemente los niveles de éstas en diversos modelos animales. Kwak et al. (2012) y Wang et al. (2014), reportaron una disminución en los niveles de ERO en ovocitos con resveratrol, debido a su potencial antioxidante. Sin embargo, en el presente estudio, los niveles de ERO aumentaron en el grupo con resveratrol (GE) en comparación con el GC, aunque no se encontraron diferencias. Este hallazgo difiere de los reportes previos y puede deberse a la diferencia de especies (bovino vs. ovino) o a factores específicos de la técnica. Por lo tanto, su efecto sobre los niveles de ERO no es concluyente y requiere más investigación para determinar su impacto en la calidad embrionaria. A pesar de que los resultados obtenidos en este estudio no fueron estadísticamente significativos, aportan datos sobre la variabilidad de la respuesta de los ovocitos de ovino al resveratrol, lo cual es fundamental para futuros estudios. Sin embargo, existen varios aspectos que deben investigarse con mayor profundidad, como determinar si existe una concentración óptima para los ovocitos de ovino, dado que estudios previos en bovinos y cerdos sugieren que ciertas concentraciones tienen efectos más pronunciados (Yang et al., 2021).

CONCLUSIÓN

El resveratrol tuvo un impacto favorable en la tasa de maduración y desarrollo embrionario en ovinos, promoviendo la MIV y la segmentación de embriones, sin modificar de manera significativa el balance redox. Esto indica que su efecto podría estar vinculado a la regulación génica en vez de a variaciones en los niveles de ERO y GSH.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acton, B. M., Jurisicova, I., Jurisica, R. F., & Casper, R. F. (2004). Alteraciones en el potencial de membrana mitocondrial durante las etapas de preimplantación del desarrollo de embriones humanos y de ratones. *Molecular Human Reproduction, 10*(1), 23–32.
2. ASEBIR. (2015). *Revista de Embriología Clínica y Biología de la Reproducción, 20*(1). Sesión de Embriología.
3. Crasta, D. N., Nair, R., Kumari, S., & et al. (2023). Los embriones partenogenéticos haploides exhiben una respuesta de estrés única al pH, estrés osmótico y oxidativo. *Reproductive Sciences, 30*, 2137–2151.
4. Corrêa, G. A., Rumpf, R., Mundim, T. C. D., Franco, M. M., & Dode, M. A. N. (2008). Oxygen tension during in vitro culture of bovine embryos: Effect on production and expression of genes related to oxidative stress. *Animal Reproduction Science, 104*(2–4), 132-142.
5. Gambin, J., López-Grueso, R., Olaso-González, G., Inglés, M., Abdelazid, K., El Alami, M., Bonet-Costa, V., Borrás, C., & Viña, J. (2013). Resveratrol: distribución, propiedades y perspectivas. *Revista Española de Geriatría y Gerontología, 48*(2), 79-88.
6. Gilchrist, R. B. (2011). Recent insights into oocyte-follicle cell interactions provide opportunities for the development of new approaches to in vitro maturation. *Reproductive Fertility and Development, 23*, 23.
7. González-Garzón, A. C., Ramón Ugalde, J. P., Ambriz-García, D. A., Vázquez-Avendaño, J. R., Hernández-Pichardo, J. E., Rodríguez-Suástegui, J. L., Cortez-Romero, C., & Navarro-Maldonado, M. d. C. (2023). El resveratrol reduce las ROS al aumentar el GSH en embriones de oveja vitrificados. *Animals, 13*(23), 3602.
8. Guija, H., & Guija, E. (2023). Radicales libres y sistema antioxidante. *Horizonte Médico, 23*(2).
9. Hardy, M. L. M., Día, M. L., & Morris, M. B. (2021). Regulación redox y estrés oxidativo en ovocitos y embriones de mamíferos desarrollados in vivo e in vitro. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(21), 11374.
10. Harvey, M. B., Arcellana-Panlilio, M. Y., Zhang, X., Schultz, G. A., & Watson, A. J. (1995). Expression of genes encoding antioxidant enzymes in pre-implantation mouse and cow embryos and primary bovine oviduct cultures employed for embryo coculture. *Biology of Reproduction, 53*(2), 532-540.
11. Ito, J., Shirasuna, K., Kuwayama, T., & Iwata, H. (2020). El tratamiento con resveratrol aumenta la biogénesis mitocondrial y mejora la viabilidad de los ovocitos vitrificados y calentados en la etapa de vesícula germinal porcina. *Cryobiology, 93*, 37–43.
12. Kawakami, T., Murai, M., & Iwata, H. (2022). Effects of antioxidants on mitochondrial function and oxidative stress during in vitro culture of bovine embryos. *Animal Reproduction Science, 221*, 106615.
13. Kwak, S. S., Cheong, S. A., Jeon, Y., Lee, E., Choi, K. C., Jeung, E. B., & Hyun, S. H. (2012). The effects of resveratrol on porcine oocyte in vitro maturation and subsequent embryonic development after parthenogenetic activation and in vitro fertilization. *Theriogenology, 78*(1), 86-101.
14. Lee, M. Y., et al. (2001). Catalase expression in developing mouse embryos. *Molecular Reproduction and Development, 60*(1), 8-15.
15. Liu, M. J., Sun, A. G., Zhao, S. G., Liu, H., Ma, S. Y., Li, M., Huai, Y. X., Zhao, H., & Liu, H. B. (2018). Resveratrol improves in vitro maturation of oocytes in aged mice and humans. *Fertility and Sterility, 109*(5), 900–907.

16. Martínez, I. J., Espinoza, M. E., Rangel, S., Ambriz, G. D., & Navarro, M. M. (2019). Effect of resveratrol on the in vitro maturation of ovine (Ovis aries) oocytes and the subsequent development of handmade cloned embryos. *Veterinaria México OA, 5*(4).
17. Meng, Q., Guo, T., Li, G., et al. (2018). El resveratrol dietético mejora el estado antioxidante de las cerdas y los lechones y regula la expresión de genes antioxidantes en la placenta mediante la vía Keap1-Nrf2 y Sirt1. *Journal of Animal Science and Biotechnology, 9*, 34.
18. Mukherjee, A., Malik, H., Saha, A. P., Dubey, A., Singhal, D. K., Boateng, S., & Malakar, D. (2014). Resveratrol treatment during goat oocytes maturation enhances developmental competence of parthenogenetic and hand-made cloned blastocysts by modulating intracellular glutathione level and embryonic gene expression. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics, 31*(2), 229-239.
19. Portocarrero, G. T., Cortez, J. V., Murga, N. L., Beloti, K., y Encina, R. (2020). Efecto del resveratrol en el porcentaje y calidad de embriones in vitro generados por separación de blastómeras en bovinos. *Revista Veterinaria, 32*(1), 101-105.
20. Rausell, F., & Tarín, J. J. (2005). Función del glutatión reducido durante la maduración y fecundación de ovocitos y desarrollo pre-implantatorio de embriones in vitro en mamíferos. *Revista Iberoamericana de Coordinadora Científica de Reproducción Humana, 22*(6), 1-10.
21. Robledo-Verduzco, J. M., Herrera-Camacho, J., Cajero-Juárez, M., Navarro-Maldonado, M. C., & García-Valladares, A. (2009). Evaluación de dos medios de maduración in vitro para la producción de embriones ovinos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10*, 95-99.
22. Sáenz Chávez, P. L., Garza Ocañas, L., Badillo Castañeda, C. T., Tamez de la O, E. J., & Triana Verástegui, J. (2014). Tolerabilidad del resveratrol y efectos sobre parámetros bioquímicos sanguíneos. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, 45*(4), 1-7.
23. Sies, H. (2020). Oxidative eustress and oxidative distress: Introductory remarks. En H. Sies (Ed.), *Oxidative stress* (pp. 3-12). Academic Press.
24. Torres-Osorio, V., Urrego, R., Echeverri-Zuluaga, J. J., & López-Herrera, A. (2019). Estrés oxidativo y el uso de antioxidantes en la producción in vitro de embriones mamíferos: Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias, 10*(2), 433-459.
25. Vásquez, N. A., Torres, V., & Rojano, B. A. (2014). Efecto del ácido ascórbico durante la maduración in vitro de oocitos bovinos en la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO) y competencia para el desarrollo embrionario. *Información tecnológica, 25*(2), 141-150.
26. Vajta, G., Peura, T. T., Holm, P., Paldi, A., Greve, T., Trounson, A. O., & Callesen, H. (2000). New method for culture of zona-included or zona-free embryos: The Well of the Well (WOW) system. *Molecular Reproduction and Development, 55*(3), 256-264.
27. Xie, Y., et al. (2016). GPX4 in the regulation of ferroptosis and embryonic development. *Antioxidants & Redox Signaling, 25*(18), 951-967.
28. Yang, L., Chen, Y., Liu, Y., Xing, Y., Miao, C., Zhao, Y., Chang, X., & Zhang, Q. (2021). The role of oxidative stress and natural antioxidants in ovarian aging. *Frontiers in Pharmacology, 11*, 617843.
29. Zhong, R.-z., & Zhou, D.-w. (2013). Oxidative stress and role of natural plant derived antioxidants in animal reproduction. *Journal of Integrative Agriculture, 12*(10), 1826-1838.
30. Zhou, W., et al. (2016). SIRT1 regulation of embryonic stem cell function. *Molecular Reproduction and Development, 83*(5), 415-427.

USO DE BIODIGESTORES EN CENTROS EDUCATIVOS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS COMO MÉTODO DE CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SISTEMA RECOLECTOR DE BASURA

Oscar Ramos Zamora[1], Elisa Velázquez López[1], Sharon Montserrat Molina Guerra[1], Fernando Pérez Fernández[1], Ángel Dávila Islas[1], José Antonio Montiel Diaz[1], Heraclio Victoria Moreno[2], y María José García Salado[1].

[1]Instituto Fray Pedro De Gante A.C., [2]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
oramos@institutofraypedro.edu.mx

RESUMEN

En el estado de Tlaxcala se generan diariamente 1,123 toneladas de basura, que se reciben en cuatro tiraderos ubicados a lo largo del estado. Sin embargo, el mal manejo de los residuos orgánicos e inorgánicos en estas instalaciones hizo que el año 2024 se conociera como el año con más incendios de basura, registrando 16 incendios. Esto ocasiona severos daños a la salud de la población que habita cerca de los tiraderos y, en general, al medio ambiente.

Por estas razones, en el Instituto Fray Pedro de Gante se busca mejorar la problemática de gestión ineficiente de residuos orgánicos e inorgánicos que se entregan al sistema recolector de basura municipal, como desechos de cafetería, poda de áreas verdes y excretas de mascotas, que contribuyen a la acumulación de basura. Se aprovechará hasta el 50% de los residuos para generar energía renovable, fertilizante natural y, además, promover la educación ambiental entre los estudiantes de bachillerato, reduciendo así la huella ecológica del instituto.

En respuesta, se construyó un prototipo de biodigestor anaeróbico que transforma estos residuos en biogás, biol (fertilizante líquido) y fertilizante sólido. Se diseñó basado en el proceso de digestión anaerobia, que involucra hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, optimizando condiciones como temperatura, pH y relación carbono-nitrógeno para maximizar la producción de biogás. Se evaluó la eficiencia del sistema en la reducción de residuos y en la generación de energía y fertilizante, analizando distintos tipos de biodigestores para seleccionar la mejor alternativa en función de los recursos disponibles.

La capacidad volumétrica del biodigestor construido es de 200 litros, lo que supone una disminución de 15 kg semanales de desechos orgánicos que ya no van al sistema recolector de basura. La temperatura se ha controlado entre los 18°C y 29°C mediante sensores y lámparas de calor. Además, se mide el pH del biol (fertilizante líquido) para mantenerlo entre 6.5 y 7.5, agregando cáscaras de huevo u otros desechos que regulen el pH. Se observa la presencia de microorganismos en las muestras tomadas, aún sin determinar, pero se presume que son bacilos y cocos.

Los resultados obtenidos muestran que el biodigestor permite reducir significativamente la cantidad de desechos orgánicos gestionados por el instituto, produciendo biogás con un contenido de metano adecuado para su aprovechamiento energético, así como biol con propiedades fertilizantes aptas para el invernadero escolar. Se identificaron desafíos como la inversión inicial y el mantenimiento técnico del sistema, pero también se observó un impacto positivo en la sensibilización ambiental de la comunidad estudiantil.

La implementación del biodigestor en el Instituto Fray Pedro de Gante constituye una solución efectiva y sostenible para el manejo de residuos orgánicos, alineándose con los principios de economía circular y fortaleciendo la educación ambiental. La segunda etapa de este proyecto es que este modelo se replique en otras instituciones educativas para fomentar la transición hacia sistemas más sostenibles, autosuficientes y amigables con el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo inicia contextualizando la problemática de la gestión de residuos sólidos en Tlaxcala, donde la generación diaria de basura y los incendios en tiraderos representan un grave riesgo para la salud y el medio ambiente. En respuesta, el Instituto Fray Pedro de Gante diseñó y construyó un prototipo de biodigestor anaeróbico de 200 litros, con el objetivo de transformar residuos orgánicos en biogás, fertilizantes líquidos y sólidos, promoviendo así una gestión más sostenible y educativa.

La sección de bases teóricas explica los diferentes tipos de biodigestores y el proceso de digestión anaerobia, resaltando su importancia en la producción de energía renovable y fertilizantes orgánicos. Finalmente, los resultados muestran que el biodigestor reduce significativamente los residuos gestionados, genera energía y fertilizantes útiles, y fomenta la sensibilización ambiental, estableciendo un modelo replicable en otras instituciones para fortalecer la educación y prácticas sostenibles en la región.

TEORÍA

BASES TEÓRICAS Y PRÁCTICAS DE LOS BIODIGESTORES

El biodigestor es el dispositivo en el cual se lleva a cabo la digestión anaerobia, y existen varios tipos según su diseño y aplicación:

- Biodigestor de Domo Fijo: Utilizado principalmente en China, se caracteriza por su cámara de gas de volumen constante. Está construido con materiales duraderos, como ladrillo y hormigón, y puede tener una vida útil de hasta 20 años. Sin embargo, requiere una inversión inicial relativamente alta y mantenimiento especializado (viewcontent.cgi Tesis).
- Biodigestor de Domo Flotante: Popular en India, cuenta con una campana que flota sobre la mezcla de residuos y se eleva a medida que se produce biogás. Es más económico de instalar y mantener, pero tiene una vida útil más corta y es menos eficiente en términos de captura de gas (Zúñiga, 2007).
- Biodigestores de Estructura Flexible: Hechos con materiales como el polietileno, son ligeros y portátiles. Están diseñados para ser económicos y fáciles de instalar, lo que los hace adecuados para comunidades rurales y pequeñas instalaciones (Buhigas, 2010).

Cada uno de estos tipos tiene ventajas y desventajas que los hacen adecuados para diferentes contextos. La elección del diseño depende de factores como el tipo y cantidad de residuos, los recursos disponibles y los objetivos del proyecto.

LA DIGESTIÓN ANAEROBIA: CONCEPTO Y PROCESO

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso consta de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Arenas Guayazán, 2019):

- Hidrólisis: Se descomponen los polímeros orgánicos complejos, como carbohidratos, proteínas y lípidos, en compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Esta etapa es clave para hacer que los materiales orgánicos sean accesibles para los microorganismos que siguen en el proceso.
- Acidogénesis: Los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono y amoníaco por bacterias acidogénicas. En esta etapa, la mayor parte del hidrógeno y dióxido de carbono que se generan se incorporan al biogás.
- Acetogénesis: Los productos de la acidogénesis son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Esta fase es crítica, ya que los compuestos intermedios que se producen deben ser transformados en formas utilizables para la siguiente fase.
- Metanogénesis: Es la etapa final en la que el acetato y el hidrógeno son convertidos en metano y dióxido de carbono por bacterias metanogénicas, produciendo biogás con un alto

contenido de metano, que es el principal componente energético del biogás (Acosta & Abreu, 2005).

La eficiencia del proceso depende de factores como la composición de la materia prima, la temperatura, el pH y la relación carbono-nitrógeno. Los residuos con alto contenido de humedad, como restos de comida y lodos de aguas residuales, son ideales para este proceso debido a la facilidad de acceso para los microorganismos (Buhigas, 2010).

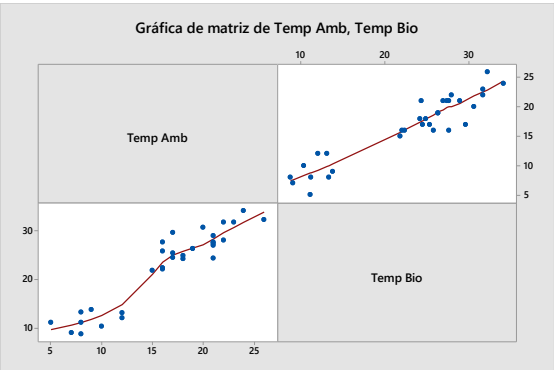
Los biodigestores tienen múltiples aplicaciones, que incluyen:

- Producción de energía renovable: El biogás producido se puede utilizar como combustible para cocinar, calentar agua o generar electricidad, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando la seguridad energética (Jyothilakshmi & Prakash, 2016).
- Gestión de residuos orgánicos: Al tratar los residuos orgánicos de manera eficiente, los biodigestores reducen la cantidad de residuos enviados a los rellenos sanitarios, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo y el agua (Arenas Guayazán, 2019).
- Producción de fertilizantes orgánicos: El digestato, subproducto del proceso de digestión anaerobia, es un fertilizante rico en nutrientes que mejora la calidad del suelo y puede sustituir el uso de fertilizantes químicos, favoreciendo la agricultura sostenible (Buhigas, 2010).

RESULTADOS

La capacidad volumétrica del biodigestor construido es de 200 litros, lo que permite una reducción semanal de 15 kg de residuos orgánicos, los cuales dejan de ser depositados en el sistema recolector de basura. Se alimenta con residuos orgánicos de origen animal o vegetal, como restos de comida, estiércol y desechos de huerta, que los microorganismos anaeróbicos descomponen para generar biogás. Es fundamental evitar los residuos no orgánicos y aquellos orgánicos contaminados o los que puedan obstruir el digestor. Además, los residuos deben tener un tamaño adecuado, no superior al de una cáscara de plátano, para asegurar una digestión eficiente y evitar bloqueos en el sistema. Se debe agregar agua al momento de alimentar el biodigestor, ya que los microorganismos anaeróbicos necesitan una alta proporción de agua para trabajar correctamente.

La temperatura interna del biodigestor se ha mantenido en un rango entre 25°C y 34°C, mediante la utilización de sensores y lámparas de calor.



El monitoreo de temperaturas se realizo mediante un controlador de temperatura digital modelo STC-3028 de origen genérico y dos termómetros de laboratorio de mercurio modelo 6337 que muestra variaciones de más menos 1 °C con respecto a el controlador de temperatura y los termómetros de laboratorio. Al analizar las lecturas de temperatura tomadas en un periodo de 45 días, los gráficos indican que la temperatura ambiente tiene un comportamiento exponencial normalizado, lo que prueba que la temperatura ambiente no presento ningún cambio abrupto o extremo que pudiera

incidir en las condiciones internas del biodigestor. Sin embargo, la temperatura interna en el biodigestor observa fluctuaciones de temperatura irregulares que indican además del asenso normal de la temperatura ambiente, las reacciones de degradación de la materia orgánica como son hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El control de temperatura es sumamente importante para mantener la salud interna de las bacterias que se encargan de degradar la materia orgánica de forma adecuada.

Asimismo, se realiza la medición y monitoreo diario del pH del biol (fertilizante líquido) con el fin de mantenerlo entre 6.5 y 7.5, ajustando el pH mediante la adición de cáscaras de huevo, ceniza de madera, cascaras de naranja u otros desechos adecuados. Por conveniencia, se realizó la prueba del alcohol, en la cual vertimos 5ml de biol en un tubo de ensayo y agregamos otros 5ml de alcohol etílico de graduación 96° se mezclan y se agitan constantemente durante 2 minutos. Si los grumos que se forman se precipitan al fondo del tubo de ensayo, indica un biol de calidad, madurado y listo para usar, pero si los grumos flotan, indica que al biol le falta maduración. En las muestras tomadas, se ha observado la presencia de microorganismos, cuya identificación aún está en proceso; sin embargo, se presume que corresponden a bacilos y cocos. De acuerdo con la bibliografía sabemos que un kilogramo de basura orgánica, al descomponerse en un vertedero, puede producir entre 2 y 400 gramos de metano. Esta cantidad varía según el tipo de materia orgánica, las condiciones ambientales y el proceso de descomposición.

CONCLUSIONES

El biodigestor en el Instituto Fray Pedro de Gante ayuda a reducir significativamente los residuos orgánicos, produciendo biogás con un contenido de metano adecuado para energía y biol con propiedades fertilizantes para el invernadero escolar. Aunque presenta desafíos como la inversión inicial y el mantenimiento técnico, tiene un impacto positivo en la sensibilización ambiental de los estudiantes. Esta iniciativa es una solución efectiva y sostenible para el manejo de residuos, promoviendo la economía circular y fortaleciendo la educación ambiental.

La segunda etapa del proyecto busca replicar este modelo en otras instituciones educativas para fomentar sistemas más sostenibles y amigables con el medio ambiente. Los estudiantes adquirieron habilidades para recopilar datos, analizarlos y presentarlos de manera efectiva, empleando herramientas como Excel y Minitab

BIBLIOGRAFÍA

1. Arenas Guayazán, B.D. (2019). Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto “La villa Solar” Ubicado en la ciudad de Buenaventura-Colombia. Universidad la Salle.
2. T. Kreis, “Speckle Metrology,” in *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996), Chapter 4, pp. 125-149.
3. Buhigas, A. B. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*. Universidad Carlos III de Madrid.
4. Acosta, Y., & Abreu, M. (2005). *La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos*.
5. Jyothilakshmi, R., & Prakash, S. V. (2016).
6. Moreno, M. (2011). *Manual de Biogás*.
7. Zúñiga, I. (2007). *Biodigestores: Sistemas para el tratamiento de residuos orgánicos*.
8. SANTA FE. (s.f.). Obtenido de Manual de uso del biodigestor: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/09/Manual-de-uso-de-biodigestores-1000l.pdf

LANTANO EN EL CRECIMIENTO DE LISIANTHUS VARIEDAD ECHO LAVANDA

Nadia Issaí Torres-Flores[1], Libia Iris Trejo-Téllez[1], Fernando Carlos Gómez-Merino[1], Yolanda Leticia Fernández Pavía[1], Tsujmejy Gómez-Navor[1]

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México, México. C.P. 56264.
nadia.torres@colpos.mx

RESUMEN

En México la floricultura es una actividad con tendencia creciente a pesar de no ser un producto de primera necesidad. En la búsqueda de alternativas que mejoren la calidad de especies ornamentales se ha evaluado la aplicación de La (elemento benéfico) tanto en el ciclo de producción como en poscosecha. En este contexto, en esta investigación se evaluaron los efectos de dos fuentes de La [$La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y $LaCl_3$] y cuatro concentraciones (0, 10, 20 y 30 μM) en el número de hojas, número de flores, área foliar y diámetros de tallo (apical, medio y basal) de lisianthus variedad Echo Lavanda, al momento de la cosecha. Para lo anterior se condujo un experimento factorial 2 × 4 que dio origen a ocho tratamientos con seis repeticiones cada uno. La unidad experimental fue una planta en una bolsa de polietileno negro con tezontle como sustrato. Las dos fuentes aplicadas fueron adicionadas a la solución nutritiva Steiner al 50%. Se realizaron tres riegos semanales de 200 mL por unidad experimental, durante el ciclo de cultivo. Los resultados indican que el tratamiento 20 μM $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ incrementó el número de hojas en 17%. Por otra parte, el número de flores y el área foliar se aumentaron con el tratamiento 20 μM $LaCl_3$ en 36 y 43%, respectivamente. Los diámetros de tallo medidos en las posiciones apical, medio y basal incrementaron con el tratamiento 30 μM $LaCl_3$ en 9, 13 y 3% respectivamente, comparados con el testigo. En lo que respecta a las concentraciones evaluadas de La, 20 μM favoreció los parámetros registrados, de las dos fuentes evaluadas se obtuvo que el $LaCl_3$ incrementa el número de hojas, número de flores y los diámetros basal y apical. Se concluye que el tratamiento con 20 μM $LaCl_3$ promueve el crecimiento de la variedad Echo Lavanda de lisianthus.

INTRODUCCIÓN

En México la floricultura es una actividad con tendencia creciente a pesar de no ser un producto de primera necesidad (Torres, 2014). Las flores cortadas constituyen cerca de la mitad del mercado de los productos hortícolas (Jiménez-Mariña, 2015). La floricultura en México es una actividad que muestra una tendencia creciente; tan solo el cultivo de tallos presenta una tasa de incremento anual del 14 % (Torres, 2014). El género *Eustoma* es originario del oeste de Nebraska, Colorado, Wioming, Dakota del Sur, Kansas y el sur de Texas; así como del norte de México (Havley & Kofranek, 1984). Su hábitat natural son las zonas áridas y semiáridas, pero se sugiere que puede adaptarse a condiciones más extremas (Valdéz-Aguilar *et al.,* 2011). Esta ornamental está siendo cultivada como flor de corte y de maceta (Camargo *et al.,* 2004).

Por otra parte, la importancia de los elementos benéficos no radica en su aceptación como elementos esenciales, sino más bien en su función única de conferir tolerancia de las plantas a diversos tipos de estrés abiótico y / o biótico (Kaur *et al.,* 2015).

En la búsqueda de alternativas que mejoren la calidad de especies ornamentales se ha evaluado la aplicación de La (elemento benéfico) tanto en el ciclo de producción (Ramírez-Martínez *et al.,* 2012) como en poscosecha (Gómez-Merino *et al.,* 2020). Algunos de los elementos considerados como benéficos son: aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), yodo (I), sodio (Na), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti) y vanadio (V); y éstos han mostrado que pueden incrementar respuestas

positivas en indicadores de crecimiento, rendimiento y calidad de las cosechas, en concentraciones muy bajas, en las soluciones (Gómez-Merino *et al.,* 2015).

El La en un metal, considerado el segundo en abundancia dentro del grupo de los elementos de las tierras raras; fue descubierto por Carl Gustaf Mosander, en Suecia en el año de 1839. Se puede encontrar en los tejidos de las plantas (Diatloff *et al.,* 2008).

En esta investigación se tuvo como objetivo la evaluación de dos fuentes [$La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y $LaCl_3$] y cuatro concentraciones de La (0, 10, 20 y 30 μM) en el número de hojas, número de flores, área foliar y diámetros de tallo (apical, medio y basal) de lisianthus variedad Echo Lavanda, al momento de la cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación fue desarrollada bajo condiciones de invernadero, utilizando como material vegetal plántulas de lisianthus de la variedad Echo Lavanda, adquiridas de la casa comercial Plántulas de Tetela, Cuernavaca, Morelos.

Se condujo en invernadero un experimento factorial 2 × 4 (Fuente de La x concentración de La) en un diseño completamente al azar. Como fuentes de La se evaluaron $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y $LaCl_3$ y las concentraciones de La en la solución nutritiva fueron: 0, 10, 20 y 30 μM, que dieron origen a ocho tratamientos con seis repeticiones cada uno. El La fue suministrado a la solución nutritiva de Steiner al 50 % (Steiner, 1984).

Se realizaron tres riegos semanales de 200 mL por unidad experimental, durante el ciclo de cultivo. La unidad experimental consistió en una bolsa de polietileno negro de 30 x 30 cm con una planta en una mezcla de tezontle (tamaño de partícula entre 5 y 8 mm) + Agrolita® (70/30, v/v) como sustrato (**Figura 1A**). El riego con las soluciones con La inició 15 días después del trasplante (ddt).

La cosecha de los tallos florales se realizó al inicio de la senescencia en promedio a los 180 ddt, en ellos se registró: número de hojas, número de flores, área foliar y diámetros de tallo (apical, medio y basal). El área foliar se midió en el integrador (LICOR, LI-3100C Area Meter, Lincoln, NE, EE. UU.) (**Figura 1B**).

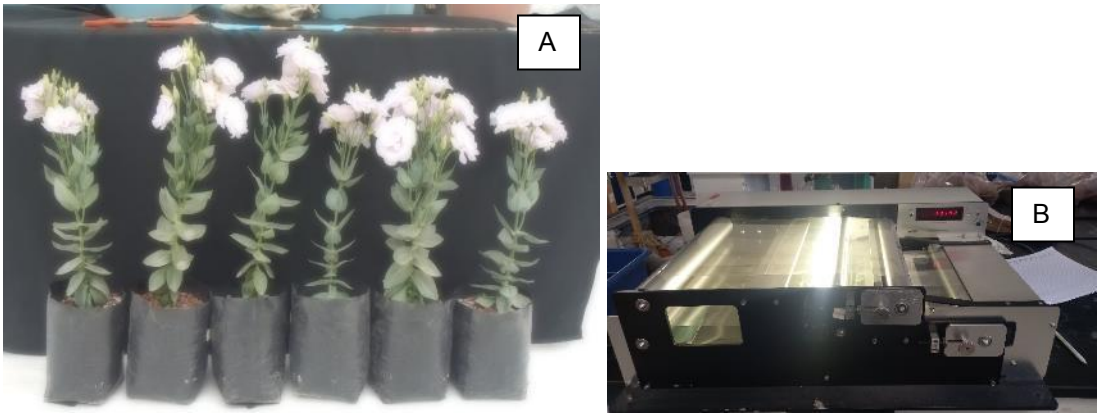


Figura 1. Plantas de lisianthus variedad Echo Lavanda establecidas en invernadero, la imagen muestra la fase de cosecha (A) e integrador de área foliar (LI-3100C Área Meter) (B).

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $p \leq 0.05$) usando el software SAS (SAS, 2011).

RESULTADOS

La fuente de La no tuvo efecto significativo en las variables evaluadas como puede observarse en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Fuentes de lantano (La) en las diferentes variables evaluadas en el cultivo de lisianthus variedad Echo Lavanda.

Fuente de La	Número de hojas	Número de flores	Área foliar (cm^2)	Diámetro basal (mm)	Diámetro medio (mm)	Diámetro basal (mm)
$LaCl_3$	41.5 a	13.0 a	646.6 a	0.805 a	0.612 a	0.422 a
$La(NO_3)_3$ $6H_2O$	40.2 a	12.3 a	649.6 a	0.794 a	0.620 a	0.406 a

Medias con letras iguales en cada columna indican que no existieron diferencias estadísticas (LSD, $+p > 0.05$)

En lo que respecta al factor concentración de La, se registraron diferencias estadísticas en las variables número de hojas, número de flores y área foliar, observándose que las concentraciones 10 y 20 μM La las incrementaron en promedio en 8.4, 26.4 y 28%, respectivamente, en comparación con el testigo sin La (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Concentraciones de lantano (La) en las diferentes variables evaluadas en el cultivo de lisianthus variedad Echo Lavanda.

Concentración de La (μM)	Número de hojas	Número de flores	Área foliar (cm^2)	Diámetro basal (mm)	Diámetro medio (mm)	Diámetro basal (mm)
0	39.8 bc	11 .0 b	568.9 b	0.761 a	0.591 a	0.414 a
10	41.6 ab	14.0 a	693.3 a	0.807 a	0.594 a	0.405 a
20	44.7 a	13.8 a	763.0 a	0.818 a	0.633 a	0.422 a
30	37.2 c	11.8 b	567.1 b	0.813 a	0.646 a	0.415 a

Medias con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (LSD, $p \leq 0.05$).

Los resultados de la interacción y los factores de estudio indican que los tratamientos 20 μM $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y 10 μM $LaCl_3$ incrementaron el número de hojas en 17 y 15 %, respectivamente en comparación con el testigo (**Figura 2A**); estos resultados coinciden con lo reportado en lechuga variedad Parris Island Coss donde hay un incremento del número de hojas del 22.3 % con el tratamiento 30 μM $LaCl_3$, mismo tratamiento que incrementa en un 31.1 % el área foliar, respecto al testigo (Contreras-Martínez *et al.*, 2021).

Por otra parte, el número de flores y el área foliar se aumentaron con el tratamiento 20 μM $LaCl_3$ en 36 y 43%, respectivamente, también en comparación con el testigo (**Figura 2B y C**). Se observó que no existieron efectos de los tratamientos evaluados en los diámetros de tallo medidos en tres posiciones (**Figura 2D-F**). Los resultados anteriores no coinciden con los reportados en el cultivo de tulipán en la variedad Ile de France, donde los diámetros de tallo medidos en las tres posiciones se incrementaron con la fuente de $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ con las dosis 5 y 10 μM; mientras que en la variedad Christmas Dream el diámetro basal fue mayor en plantas tratadas con 30 y 40 μM $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y los diámetros medio y apical aumentaron con 40 μM $LaCl_3$ (Ramírez-Martínez *et al.,* 2011). Por tanto, ha sido ampliamente demostrado que el La en el cultivo de tulipán mejora indicadores de calidad (Gómez-Merino *et al.,* 2015).

En especies no ornamentales, también existen reportes del efecto benéfico del La. En lechuga los tratamientos de 7.5 y 30 μM $LaCl_3$ incrementaron el diámetro de tallo (Contreras-Martínez *et al.*, 2021). El suministro de La en la solución nutritiva en concentraciones menores a 10, 30 y 40 mg L^{-1} en los cultivos de trigo, colza y arroz, respectivamente, estimula el crecimiento (Xiong y Zhang, 1997).

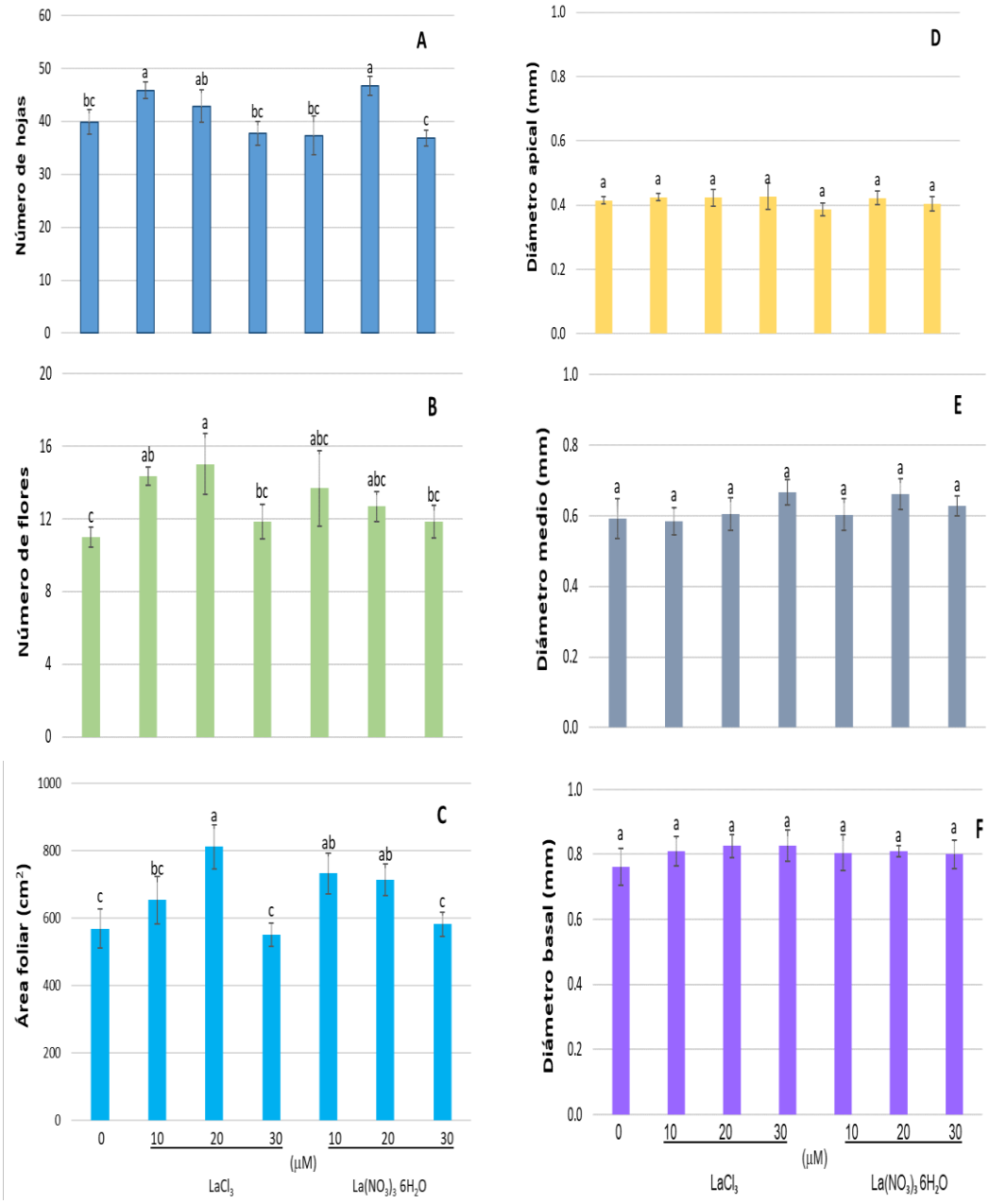


Figura 2. Número de hojas (A), número de flores (B), área foliar (C), diámetro de tallo apical (D), diámetro de tallo medio (E) y diámetro de tallo basal (F) de plantas de lisianthus tratadas con dos fuentes y cuatro concentraciones de lantano. Barras ± DE con letras distintas en cada figura indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $p \leq 0.05$) entre tratamientos.

Se ha evidenciado que el La^{+3}, después de entrar en el apoplasto de la raíz de los tejidos meristemáticos, se transloca a través del xilema en los brotes de plantas superiores ahí, el La puede estimular el crecimiento de la planta (Liu *et al.,* 2012).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en lisianthus variedad Echo Lavanda permiten concluir que el La es un elemento benéfico que favorece el crecimiento; en específico el tratamiento 20 µM $LaCl_3$ incrementa

el número de hojas, el número de flores y área foliar. Por tanto, esta dosis se recomienda para la producción de esta especie.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Halevy, A. Kofranek, “Evaluation of lisianthus as a new flower crop”, HortScience., Vol. 19, 1984, pp. 845-847.
2. A. Steiner, “The universal nutrient solution”, In: *ISOSC Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture*, The Netherlands, 1984, pp. 633-649.
3. D. Liu, Y. Lin, X. Wang, “Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings”, J. Plant Nutr. Soil Sci., Vol. 175, 2012, pp. 907-911.
4. E. Diatloff, F. V. Smith, C. J. Asher, “Effect of lanthanum and cerium on the growth and mineral nutrition of corn and mungbean”, Ann. Bot. London, Vol. 101, 2008, pp.971-982.
5. F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, C. Cuacua-Temiz, M. A. Jácome-Chacón, H. E. Sentíes-Herrera, “Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola”, Agroentorno, Vol. 166, 2015, pp. 19-20.
6. F. C. Gómez-Merino, A. M. Castillo-González, M. Ramírez-Martínez, L. I. Trejo-Téllez, “Lanthanum delays senescence and improves postharvest quality in cut tulip (*Tulipa gesneriana* L.)”, Sci. Rep., Vol. 10, 1, 2020, 19437.
7. J. Xiong, and Z. Zhang, “Maximum threshold of rare earth concentration and crop growth”, Chinese J. Ecol., Vol. 16, 1, 1997, pp. 1-7.
8. L. A. Valdéz-Aguilar, C. M. Grieve, A. R. Mahar, M. E. Giffen, D. J. Merhaut, “Growth and ion distribution is affected by irrigation with saline water in selected landscape species grown in two consecutive growing seasons: spring-summer and fall-winter”, HortScience, Vol. 46, 2011, pp. 632-642.
9. L. Jiménez-Mariña, “El cultivo de la Dalia. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas”, Ministerio de Educación Superior, Cuba, Cultivos Tropicales, Vol. 5, 36, 2015, pp. 107-115.
10. M. Ramírez-Martínez, “Respuestas agronómicas y fisiológicas del tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) al lantano”, 2011, [Tesis doctoral, Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México], pp. 1-272.
11. M. Ramírez-Martínez, L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, A. M. Castillo-González, I. Hernández-Ríos, E. Hernández-Acosta, “Bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán tratado con lantano”, Terra Latin., Vol. 30, 3, 2012, pp. 229-238.
12. M. S. Camargo, L. K. Shimizu, A. M. Saito, H. C. Kameoka, C. S. Mello, C. Q. A. Carmello, “Crescimento e absorção de nutrientes pelo Lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) cultivado em solo”. Hortic Bra., Vol. 22, 1, 2004, pp. 143-146.
13. R. Torres-L, “Floricultura Mexicana: gran industria en el anonimato”, http://www.tierrafertil.com.mx/floricultura-mexicana-gran-industria-en-el-anonimato/, 2014.
14. S. Kaur, N. Kaur, K. H. M. Siddiqueb, H. Nayyara H, “Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses”, Archives of Agronomy and Soil Sci., Vol. 62, 7, 2015, pp. 905-920.
15. SAS Institute Inc, “SAS/STAT Users Guide”. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA, 2011.
16. G. Contreras-Martínez, “Efecto del cloruro de Lantano en el crecimiento, desarrollo y calidad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un sistema de raíz flotante”, [Tesis de maestría, Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México], pp. 1-82.

EVALUACIÓN IN VITRO DE ACTIVIDAD ANTAGÓNICA BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO DE PLANTAS Y HONGOS FITOPATÓGENOS

Blanca Estela Gómez Luna, Angélica Guadalupe Juárez Morelos, Adan Topilinzin Morales Vargas, Juan Caros Ramírez Granados

Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Agroindutrial, Ingeniería en Biotecnología
be.gomez@ugto.mx

RESUMEN

Una alternativa al control químico de hongos fitopatógenos en la producción de plantas de importancia agrícola es el uso de agentes de control biológico con énfasis en la aplicación de antagonistas nativos, siendo una herramienta sustentable que no afecta al ambiente por ser biodegradable, no ocasionar enfermedades ni en plantas ni en animales y sin residuos tóxicos que se acumulan en suelo, agua, aire y el producto de consumo humano o animal.

Las bacterias promotoras del crecimiento son habitantes naturales del suelo y son capaces de brindar distintos beneficios a las plantas como mejorar el aprovechamiento de los nutrientes, producción de fitohormonas y tienen actividad de control biológico.

En este trabajo se analizó la actividad antagónica de una colección de bacterias promotoras de crecimiento aisladas de suelo del Área Natural Protegida “Cerro el Culiacán” ante 5 hongos fitopatógenos en condiciones in vitro. En placas Petri con medio PDA se colocó en una sección de la placa un cilindro de agar y micelio con el hongo fitopatógeno y en la otra sección se inoculó la bacteria, se incubaron a 28°C por 30 días y se midió el diámetro de crecimiento del hongo, con estos datos se calculó porcentaje de inhibición. Los mejores resultados se obtuvieron con las cepas con las claves 054, 102, 104, 106, 117, 119, 261, 264, 265, 265-A, 265-B y 266 con porcentajes de inhibición en 90%, así como el menor porcentaje que se obtuvo fue del 60%.

Con estos resultados se propone el uso de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal como agentes de control biológico en la producción vegetal de forma sustentable y amigable con el ambiente al reducir la aplicación de agroquímicos.

INTRODUCCIÓN

La agricultura convencional se caracteriza por el uso excesivo de fertilizantes para aumentar la producción agrícola. La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirmó que los plaguicidas en países en desarrollo causan un millón de casos de intoxicación y cerca de 20,000 muertes anualmente.

La alternativa actual para optimizar los cultivos son los biofertilizantes, entre los elementos más valiosos en la producción de estos biofertilizantes están los microorganismos promotores de crecimiento vegetal, aislados de ambientes diversos, con la habilidad potencial de afectar positivamente el crecimiento de las plantas (Bashan et al., 2014).

Las especies bacteriana presentes en la rizósfera de las plantas, que crecen en, sobre o alrededor de la raíz y que estimulan el crecimiento vegetal, se conocen colectivamente como rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas, estás promueven el crecimiento de manera directa; a través, de procesos tales como: fijación atmosférica de nitrógeno, solubilización de fósforo, movilización de otros minerales esenciales (por ejemplo, Zn y Fe) o regulación de los niveles de hormonas vegetales. Además, pueden ejercer un efecto indirecto por su actividad como agentes de control biológico contra patógenos, depredadores y malezas (Glick, 2012).

Los mecanismos de biocontrol que han sido reconocidos por las bacterias promotoras de crecimiento son la competencia por un nicho ecológico, la síntesis de compuestos químicos inhibitorios como los sideróforos, los antibióticos, las enzimas líticas y la inducción de resistencia sistémica en la planta (Matiru & Dakora, 2004).

TEORÍA

En los últimos años, las enfermedades causadas por hongos han ocasionado fuertes pérdidas económicas en la producción de diferentes cultivos en México, convirtiéndose en uno de los problemas más importantes, siendo la región del Bajío una de las zonas con fuerte incidencia de enfermedades de origen fúngico, muchas de ellas aún sin conocer (Montes-Belmont et al, 2003).
Los fungicidas son productos químicos diseñados para prevenir, detener o eliminar el crecimiento de los hongos fitopatógenos en pantas y cultivos vegetales. Estos actúan interfiriendo con los procesos biológicos de los hongos, ya sea de forma directa o al fortalecer la resistencia de la planta. Existen dos tipos de fungicidas, los sistémicos y los de contacto. Los fungicidas sistémicos, son absorbidos por la planta y se mueven a través de su sistema vascular. Mientras que los de contacto, funcionan cuando están en contacto directo con el hongo fitopatógeno (Abella,1984).

Los agricultores usan los fungicidas como medida de control, pero su uso excesivo ha promovido la resistencia de los patógenos a dichos agroquímicos, aunado a que generan residuos tóxicos en alimentos y en el medio ambiente. Debido a esto, se evaluaron métodos de control alternativos a los fungicidas, como el control biológico que puede ser una alternativa eficaz, económica y libre de riesgo.

Las bacterias promotoras de crecimiento también llamadas rizobacterias o PGPR por sus siglas en inglés, son bacterias que habitan en la rizosfera, área del suelo que se encuentra unida a la raíz y que se extiende a pocos milímetros de la superficie del sistema radicular. Esta zona se caracteriza por la interacción única y dinámica de los procesos biogeoquímicos que ocurren entre raíces de las plantas y microorganismos del suelo, los cuales se ven altamente influenciados por los exudados radiculares, además, alberga una gran cantidad de microorganismos que en general estimulan el crecimiento vegetal y reducen la incidencia de enfermedades (Molina-Romero et al., 2015).

Las moléculas liberadas por estos microorganismos son biodegradables y se necesitan en pequeñas cantidades, a diferencia de algunos agroquímicos que son resistentes a la degradación y se aplican a grandes cantidades a los cultivos agrícolas (Molina-Romero et al., 2015). Por estos beneficios se aprecia el potencial de las bacterias promotoras del crecimiento contribuye al desarrollo de una agricultura sostenible por lo que su aplicación en los sistemas productivos constituye una alternativa viable para reducir los costos de producción y el impacto ambiental asociado a la fertilización química.

Las rizobacterias presentan grandes ventajas para incrementar la productividad de los cultivos mediante mecanismos directos como: fijación de nitrógeno, síntesis de fitohormonas (auxinas, giberelinas, citocinas) mediante mecanismos directos como: fijación de nitrógeno; síntesis de fitohormonas (auxinas, giberelinas, citocininas), producción y síntesis de sideróforos, sìntesis de la enzima ACC Deaminasa; así como por mecanismos indirectos como: producción de antibioticos, reducción de fierro, resistencia inducida (Dobbelaere et al., 2003), como se muestran los mecanismos en la figura 1.

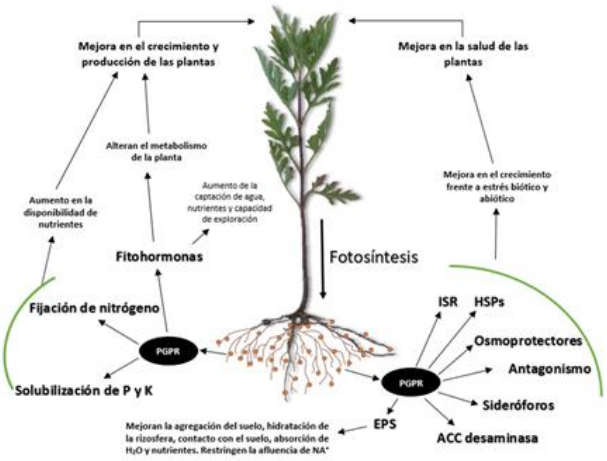


Figura 1 Mecanismos de acción las Bacterias Promotoras del Crecimiento en la rizosfera, Velasco-Jimenez, et al., 2020.

Los hongos fitopatógenos causan más del 70 % de enfermedades en plantas, son organismos de grupos filogenéticamente diversos, que al enfermar a la planta crean signos y síntomas que la deterioran lentamente, lo que provoca grandes afectaciones en ella, una de ellas la muerte. En comparación con los bacterias, virus y nematodos, son los patógenos que más daño realizan a las plantas (Agrios, 1995).

Debido a la invasión de estos patógenos, los síntomas pueden ser morfológicos, histológicos y fisiológicos, siendo visiblemente más comunes: clorosis, necrosis, marchitez, pudriciones secas o húmedas, disolución de tejido y crecimiento anormal, los cuales están relacionados con alteraciones en el tejido como vacuolosis, plasmólisis, citólisis, hipertrofia e hiperplasia y solo pueden ser evidenciados con equipos de alta resolución como los microscopios electrónicos (Granados, M., 2022).

Rhizoctonia solani con frecuencia afecta a las semillas durante la germinación, en las plántulas induce muerte pre o post emergente y en plantas pudre la raíz; provoca diferentes enfermedades dependiendo del hospedante y su síntoma más común es la pudrición. Causa daños graves de las plántulas de hasta un 80-100% y una pérdida de rendimiento final de hasta un 30% (Engelkes & Windels, 1996).

Alternaria spp. es un hongo dematiáceo, perteneciente al orden Pleosporales, familia Pleosporaceae. Se encuentra en el suelo, aire y material en descomposición, se caracteriza por la producción de conidióforos simples y erectos, en cuyo extremo se forman cadenas simples o ramificadas de conidios (Rivas, L., 2014). Los síntomas se dan en tallos, hojas y cabezas florales, ya que las semillas suelen ser asintomáticas.

Fusarium spp., el hongo se puede propagar mediante el uso de esquejes infectados u otras formas de propagación vegetativa tomadas de plantas sanas pero infectadas. Infecta específicamente ciertas partes de la planta, como plántulas, mazorcas, granos, raíces o tallos, además, causa diversas enfermedades, provocando la reducción del rendimiento comercial y disminuyendo la calidad del producto (Lamprecht et al., 2011).

En campo, *Fusarium* se puede identificar porque forma lesiones hundidas de color negro o marrón en la base de los tallos, además, pueden presentarse manchas rojizas en los peciolos cercanos a la

copa de la planta y, a veces, masas de micelios rosadas o blancas que crecen en la base de los esquejes o en la copa de una planta.
Fusarium oxysporum, crece entre las células de la raíz y hasta el tallo lo que provoca la marchitez de la panta. El signo principal que presentan las plantas infectadas son hojas amarillentas que posteriormente se marchitan, a menudo a un lado del tallo. Si se corta la base del tallo es posible observar una decoloración café alrededor de los haces vasculares.

Una alternativa al uso de plaguicidas es el uso de biofertilizantes, preparados de microorganismos aplicados al suelo y/o planta. Entre los microorganismos utilizados están las bacterias promotoras de crecimiento, que pueden aumentar la productividad vegetal y el crecimiento.

Buscando alternativas a la práctica convencional de aplicar los diversos agroquímicos se planteó esta propuesta investigación, en la que se evaluó la actividad antagónica de las bacterias promotoras del crecimiento contra hongos fitopatógenos realizando confrontaciones 1:1.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la preparación del medio Agar Dextrosa y Papa (PDA), se colocó 200 gramos de papa cruda cortada en cuadros dentro de un recipiente de aluminio al cual se le vertió un litro de agua destilada, esto se puso a calentar hasta su ebullición por 20 minutos. Pasados los 20 minutos, la solución fue filtrada y aforada hasta un litro. Finalmente, los frascos con el medio PDA fueron llevados a esterilizar a la autoclave a 121ºC, 15 lb de presión por 15 minutos. Al estar esterilizado el medio, se vertió en cajas Petri limpias y estériles.

Se realizaron confrontaciones 1:1, siguiendo la técnica in vitro. Esto se realizó con los seis hongos y las 56 bacterias que se obtuvieron en las colecciones.

Primero se realizó la inoculación del hongo fitopatógeno en un extremo de la caja Petri, se incubo a 28°C por 48 horas y después se inoculo la bacteria en el extremo opuesto.

Las cajas Petri con las confrontaciones se incubar a 28ºC y cada 24 horas fue medido el radio del micelio del hongo con un vernier hasta que el micelio se extendió por toda la placa o hasta que fuera detenido su crecimiento por la bacteria. Se tomaron fotografías de las confrontaciones en diferentes etapas del crecimiento de cada hongo.

El porcentaje de inhibición del crecimiento fue determinado comparando el radio inicial y final de cada hongo en cada una de las confrontaciones que se realizaron a través de la formula Ezziyyani, M. et. al., (2004), la cual es mostrada a continuación:

$$PICR = (R1 – R2) /R1 \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde R1 es el radio que se midió al finalizar la confrontación y R2 es el radio medido a las 24 horas de inicio de la confrontación.

RESULTADOS

Se observó que, al sembrar *Rhizoctonia solani* en el medio PDA creció rápidamente, tomo alrededor de 120 horas para que cubriera completamente la caja Petri, su apariencia es de color café claro y de textura algodonosa. Este experimento tuvo una duración de 960 horas, en la tabla 1 se muestra la cantidad de horas que duro cada confrontación.

Este fitopatógeno cubrió rápidamente con su micelio la zona en donde fue sembrada la bacteria en la mayoría de las confrontaciones, sin embargo, las colonias bacterianas crecieron debajo del micelio.

Alternaria spp, este hongo tuvo un crecimiento rápido, a medida que crecía iba oscureciendo el medio PDA. Este experimento tuvo una duración de 744 horas, se registró el término de cada una de las confrontaciones.

Fusarium oxysporum, se caracteriza por su micelio beige y su textura es algodonosa, este hongo fitopatógeno tuvo un crecimiento un poco más lento que los anteriores, tardo alrededor de 144 horas para cubrir por completo el medio PDA.

Este experimento tuvo una duración de 720.
Fusarium spp., se caracteriza por su micelio color lila en el centro y color blanco en sus extremos. Este hongo tardó alrededor de 264 horas en cubrir por completo el medio PDA, tuvo un crecimiento más lento comparado con los demás hongos.

En este experimento la mayoría de las bacterias detuvo el crecimiento del hongo alrededor de 216 horas. El crecimiento del micelio de los hongos y el efecto de inhibición se muestran en la figura 2 y el porcentaje de inhibición en la tabla 1.

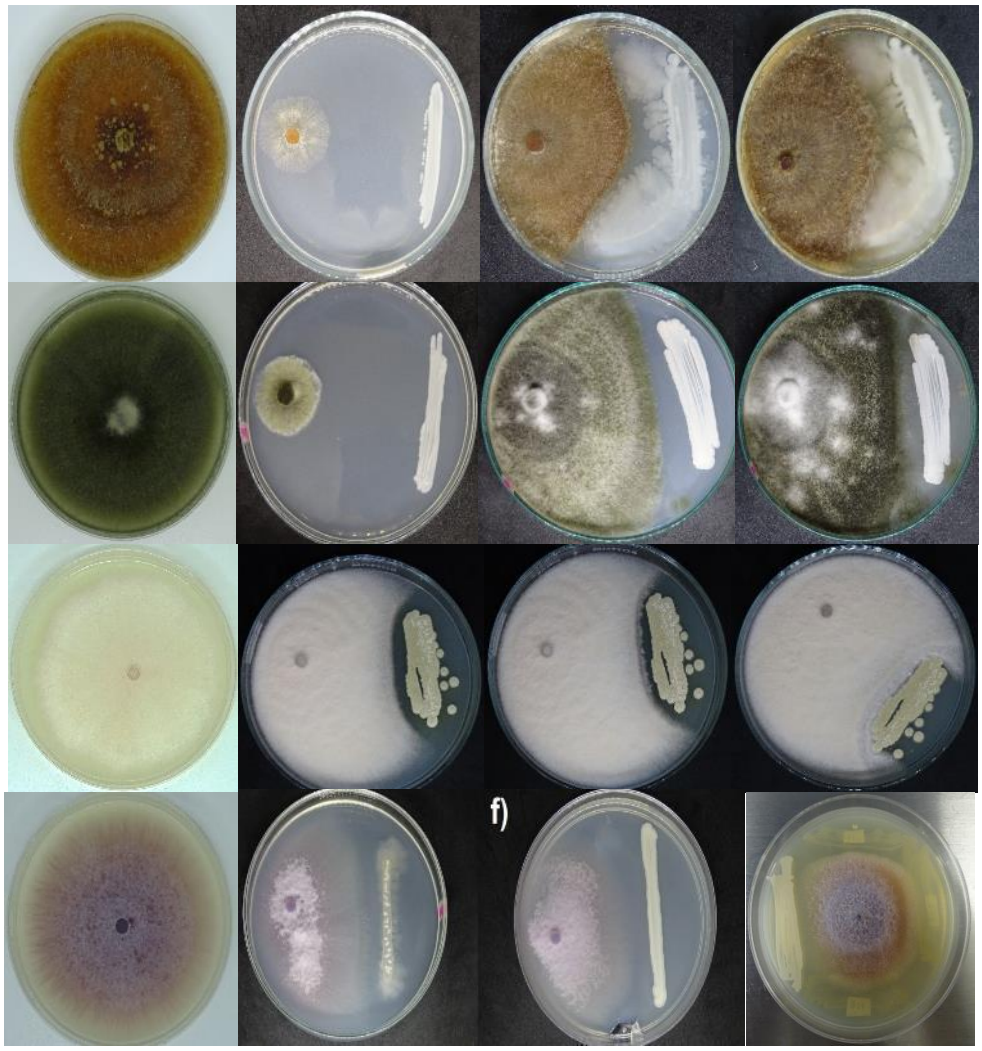


Figura 2. Confrontaciones de Rhizobacterias y Hongos fitopatógenos: 1) *Rizoctonia solani*, 2) *Alternaria*, 3) *Fusarium oxisporum*, 4) *Fusarium spp*

Tabla 1. Porcentaje de inhibición en los diferentes hongos presentado por efecto de las rizobacterias.

Hongo	Rizobacteria	% de Inhibición
Rhizoctonia solani	121, 213, 308	70 a 93%
Alternaria spp	265, 253, 302	70 a 93%
Fusarium oxysporum	106, 201, 265	60 a 85%
Fusarium spp	202, 301, 303	75 a 95%

Se observó que *Rhizoctonia solani* tuvo un crecimiento radial acelerado por lo que en pocas horas cubría casi por completo el medio PDA, en este caso solo encontramos dos cepas 104 y 117 que detenían el crecimiento del hongo fitopatógeno por más tiempo. El micelio algodonoso con el que se caracteriza este hongo se sobreponía fácilmente a las bacterias, en estos casos se observaba la confrontación por la parte inferior de las cajas y así se realizaba la medición para obtener los porcentajes de inhibición.

Se han encontrado cepas con importante actividad biológica en la rizosfera de cultivos de maíz (*Zea mays* L.) en San Luis Potosí se realizaron confrontaciones directas de 18 cepas bacterianas con *Fusarium spp*. y *Rhizoctonia solani*, este último patógeno presentando un porcentaje de inhibición de hasta el 55%, finalmente con las pruebas moleculares se identificaron a las cepas bacterianas dentro de los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* (Hernández-Delgado, et al., 2007).

Alternaria spp. como *Rhizoctonia solani* tuvieron un crecimiento radial acelerado, con este hongo pudimos observar que al pasar los días el micelio iba cambiando de color a un tono más oscuro, al realizar las confrontaciones se observó que la mayoría de las bacterias detenían su crecimiento un tiempo determinado, pero, solo tres cepas bacterianas detuvieron su crecimiento.

Fusarium oxysporum al que caracterizamos por su micelio color beige y textura algodonosa, presento un crecimiento radial lento. Durante las confrontaciones pudimos observar el crecimiento amorfo del hongo ante algunas cepas.

Fusarium spp. se caracterizó por su micelio en colores de lila hasta llegar al morado, esto dependía del tiempo que tenía de siembra, ya que al pasar de los días el micelio se iba oscureciendo del centro y sus extremos tenían tonalidades más claras. Este hongo se tuvo que sembrar con mucha precisión y cuidado ya que es de fácil diseminación y al no hacerlo con esta técnica crecía de manera amorfa y esto afectaba nuestros rangos de medición.

La eficiencia antagónica de las cepas de rizobacterias contra hongos fitopatógenos es generalmente mediada por uno o más mecanismos, como la producción de sustancias antimicrobianas, competición por nutrientes debido la producción de sideróforos, producción de enzimas quitinolíticas algunas cepas presentan esta actividad y sustancias volátiles algunas cepas producen estos compuestos, por lo que este efecto puede deberse a una suma de mecanismos implicados en el biocontrol de fitopatógenos.

El control biológico de fitopatógenos por la producción de compuestos bioactivos puede llegar a ser una alternativa eficaz, económica y libre de riesgo frente a los numerosos y crecientes problemas derivados del uso indiscriminado de agroquímicos (Pérez-Moreno et al., 2015).

Con este trabajo, se demostró que algunas cepas de la colección de bacterias tienen capacidad antagónica para detener el desarrollo de los hongos fitopatógenos.

CONCLUSIONES

La colección de las cepas de rizobacterias presentan una diversidad de actividad metabólica con los diferentes hongos fitopatógenos, algunas presentan una inhibición más activa a uno u otro hongo y otras fue menor.

La colección de cepas al presentar la capacidad de suprimir enfermedades en plantas puede utilizarse con fines de producción de bioinsumos en la agricultura sostenible. Se recomienda evaluar consorcios de estas cepas para potenciar sus efectos benéficos en cultivos de interés agrícola.

Las rizobacterias representan una alternativa biotecnológica en la agricultura principalmente por la gran cantidad de mecanismos moleculares que permiten mejorar el rendimiento y la salud de las plantas. Los inoculantes a base de rizobacterias son una alternativa biotecnológica en la agricultura sustentable, que permite incrementar el rendimiento, disminuyendo los costos de producción en la práctica agrícola. Igualmente, las rizobacterias pueden ayudar a disminuir el uso de fertilizantes químicos, plaguicidas y reguladores artificiales que tienen efectos negativos en los ecosistemas naturales, y contribuir a una agricultura más amigable con el medio ambiente. Es necesario una mayor investigación en la comprensión de los mecanismos de fitoestimulación en diferentes condiciones ambientales y diferentes cultivos, así como encontrar cepas que se puedan controlar en diferentes escenarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. S. Abella, Report of the Commission on Equality in Employment, 1984.
2. G. N. Agrios, Fitopatología. Ciudad de México: Limusa, 1995.
3. Y. Bashan, Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives. Plant soil, 2014, 378:1-33.
4. S. Dobbelaere, Plant growth promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. Critical reviews in plant science, 2003, 22(2):107-149
5. C. A. Engelkes, Susceptibility of sugar beet and beans to *Rhizoctonia solani* AG-2-2 IIIB and AG-2-2 IV. Plant Dis., 1996, 80: 1413-1417.
6. M. Ezziyyani, *Trichoderma harzianum* como biofungicida para el biocontrol de *Phytophthora capsici* en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.), An Biol., 2004, 26:35-45.
7. B. Glick, Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. Scientifica, 2012. 1-15.
8. M. Granados-Montero, Patogenicidad de hongos asociados a plantas de fresa (*Fragaria ananassa*) y descripción patoestructural del patosistema. Agronomía costarricense, 2022, 46(2): 09-28.
9. S. Hernández-Delgado, Incidencia de hongos potencialmente toxígenicos en maíz (*Zea mays* L). almacenado y cultivado en el Norte de Tamaulipas, México. Revista Mexicana de Fitopatología, 2007), 25(2): 127-133.
10. S. C. Lamprecht, *Fusarium graminearum* species complex associated with maize crowns and roots in the KwaZulu-Natal Province of South Africa. Plant Disease, 2011, 95:1153-1158.
11. V. N. Matiru, Potential use of rhizobial bacteria as promoters of plant growth for increased yield in landraces of African cereal crops. African Journal of Biotechnology, 2004, vol. 3, p. 1-7.
12. D.Molina-Romero, Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. Revista de La DES Ciencias Biológico Agropecuarias, 2015, 17(2), 24-34.
13. L. Pérez Moreno, Sensibilidad in vitro de dos especies de Sclerotinia spp. y Sclerotium cepivorum a agentes de control biológico y fungicidas. Revista Mexicana de Fitopatología, 2015, vol. 33, núm. 2, pp. 256-267
14. L. Rivas, Alternaria spp. Revista chilena de infectología, 2014, 31. 1-6.
15. A. Velasco-Jiménez, Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. Terra Latinoamericana, 2020, 38:333-345.

RECOLECCIÓN Y REPRODUCCIÓN DEL HONGO PEDO DE LOBO *(Lycoperdon Perlatum)* A TRAVÉS DE MEDIOS DE CULTIVOS ESPECÍFICOS

Tannya Joceline Gutiérrez Pérez[1], Minerva Rosas Morales[1], Ada María Ríos Cortés[1], Gabriel Ríos Cortés[2]

[1]Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, [2]Instituto Tecnológico de Orizaba laboratorio de química analítica.

Tgutierrezp2400@alumno.ipn.mx

RESUMEN

En la actualidad hay poco conocimiento sobre la variedad, diversidad, conservación, extracción y compuestos bioactivos presentes en los hongos. Algunos hongos se han utilizado de manera importante en procesos biotecnológicos como productores de compuestos de interés para la sociedad. Estos tienen aplicaciones que se extienden desde el ámbito cosmético hasta usos en la medicina. El hongo *Lycoperdon Perlatum* presenta dos compuestos de interés terapéutico, uno de ellos es el ácido calvatico derivado de una fermentación obtenido a través del micelio del hongo y el otro compuesto es la calvasterona presente en el cuerpo fructífero del hongo perteneciente al grupo de los esteroides dimericos. El hongo se recolecto en el municipio de Ixtaczoquitlán en la comunidad de Cuesta del Mexicano a de 783 msnm, se encontró en una zona húmeda, con pastizal y hojas de los árboles en descomposición. Para la recolección de las muestras se desinfectaron las manos con etanol al 70%, para posteriormente sustraer el hongo del suelo y se metieron en bolsas de papel Kraft para posteriormente refrigerarse a 4°C. Para la obtención del ácido calvatico es necesario realizar medios de cultivo para obtener el micelio del hongo, por ello se realizaron 3 medios de cultivo inoculados con espora del hongo. Los medios realizados fueron agar malta, agar papa dextrosa y agar saboraud, solo el medio de agar papa dextrosa mostró resultados satisfactorios. *Lycoperdon perlatum* desarrollo micelio en tres días, incubado a 30°C. Por lo que la capacidad del hongo para su desarrollo depende del medio de cultivo y de las condiciones.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo urbano ha llevado a la perdida de hábitats naturales lo cual ha repercutido desfavorablemente en las poblaciones silvestres, debido a esto hay poco conocimiento sobre la variedad, diversidad y conservación de los hongos, a pesar de que estos organismos son los más numerosos en la Tierra[1].

Algunos hongos se han usado de manera importante en procesos biotecnológicos como productores de compuestos de interés para la sociedad[2]. Estos tienen aplicaciones que se extienden desde el ámbito cosmético hasta sus usos en la medicina. Por lo que la conservación y el cultivo de hongos en diferentes medios de cultivo adquiere cada vez una mayor importancia en la conservación de la biodiversidad del reino fungí.

El hongo *Lycoperdon perlatum* presenta compuestos de interés terapéutico, algunos de ellos son derivados de una fermentación obtenida a través del micelio del hongo[3]. El objetivo de este trabajo fue probar diferentes medios de cultivo inoculados por esporas del hongo para obtener una cinética de crecimiento.

[1] C.Sanchez(2022)
[2] C.Ramesh y M. Pattar (2010)
[3] H. Umezawa, et al (1975)

ANTECEDENTES

México se considera un país megadiverso, ocupando el quinto lugar en el mundo por su gran número de especies de hongos. Estos son el segundo organismo más numeroso en la Tierra, por lo que se convierten de gran importancia para los ecosistemas del mundo, teniendo una gran capacidad de adaptación y cumpliendo con funciones importantes para el equilibrio natural[4].

Dentro de la micología existen diferentes clasificaciones según su especie, genero, orden, clase, division y reino, clasificándose según las características de cada hongo. *Lycoperdon perlatum* también llamado pedo de coyote, bejín perlado, cuesco de lobo, pedo de lobo, es un hongo que pertenece a la clase basidiomycetes, se encuentra en el orden de los gasterales, pertenece a la familia de los *Lycoperdaceae* y al género *Lycoperdon*[5].
Este hongo es comestible en etapa joven, cuando es de color blanco (figura 1) y no es comestible cuando alcanza la madurez en esta etapa es de color marrón, su gleba madura es pulverulenta de color café claro y cargada de esporas, mientras que en la parte superior se abre un orificio denominado peristoma por el cual expulsa esporas de color café claro. (figura 3) (M. Bon, 2004)

Figura 1. Etapa joven de Lycoperdon perlatum[5].

Debido a que *Lycoperdon perlatum* tiene diferentes tipos de compuestos de interés terapéutico, es importante su conservación y preservación, a través de diferentes tipos de medios de cultivo, los medios más utilizados para el crecimiento de hongos son agar papa dextrosa, agar extracto malta y agar saboraud, utilizando las condiciones adecuadas para su desarrollo[6].

MATERIALES Y METODOS

- Recolección del hongo

El hongo *Lycoperdon perlatum* se recolecto en la comunidad de Cuesta del mexicano, perteneciente al municipio de Ixtaczoquitlán en el cerro conocido como Grutas de Galicia a 783 msnm (figura 2). El clima en la zona es templado-húmedo, con una temperatura de 18°C a 20.6°C, con lluvias abundantes en verano y principios de otoño, con menor intensidad en invierno. La comunidad de Cuesta del mexicano tiene una población de 863 habitantes y su vegetación es boscosa en su mayoría, aunque también se encuentran diversos tipos de cultivos como chayotales, platanales, cafetales, entre otros[7].

[4] C.Sanchez (2022)
[5] CONABIO (2020)
[6] D. Salmones y G. Mata (2012)
[7] Gobierno municipal de Ixtaczoquitlán (2022-2025)

Figura 2. Ubicación del área de recolección (Ixtaczoquitlán)[8]

Se recolecto con las manos previamente desinfectadas con alcohol y guardados en bolsas de papel Kraft para su posterior refrigeración a 4°C durante las primeras 4 horas después de haberlos cortado.

- Medios de cultivo

Los medios de cultivo específicos de agar seleccionados para la siembra del hongo fueron agar papa dextrosa, agar malta y agar Sabouraud, los cuales fueron inoculados por esporas del hongo e incubados a 30°C. La cinética de crecimiento del hongo se llevó a cabo durante el crecimiento micelial.

RESULTADOS

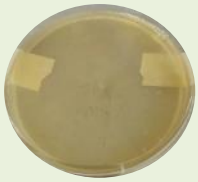
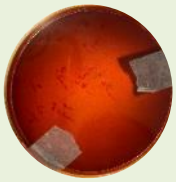
Las muestras de *Lycoperdon perlatum* se recolectaron en etapa madura. (Figura 3)

Figura 3.Lycoperdon perlatum en etapa madura

Se realizo la siembra del hongo en agar malta, agar papa dextrosa y agar sabouraud, inoculados mediante esporas del hongo.

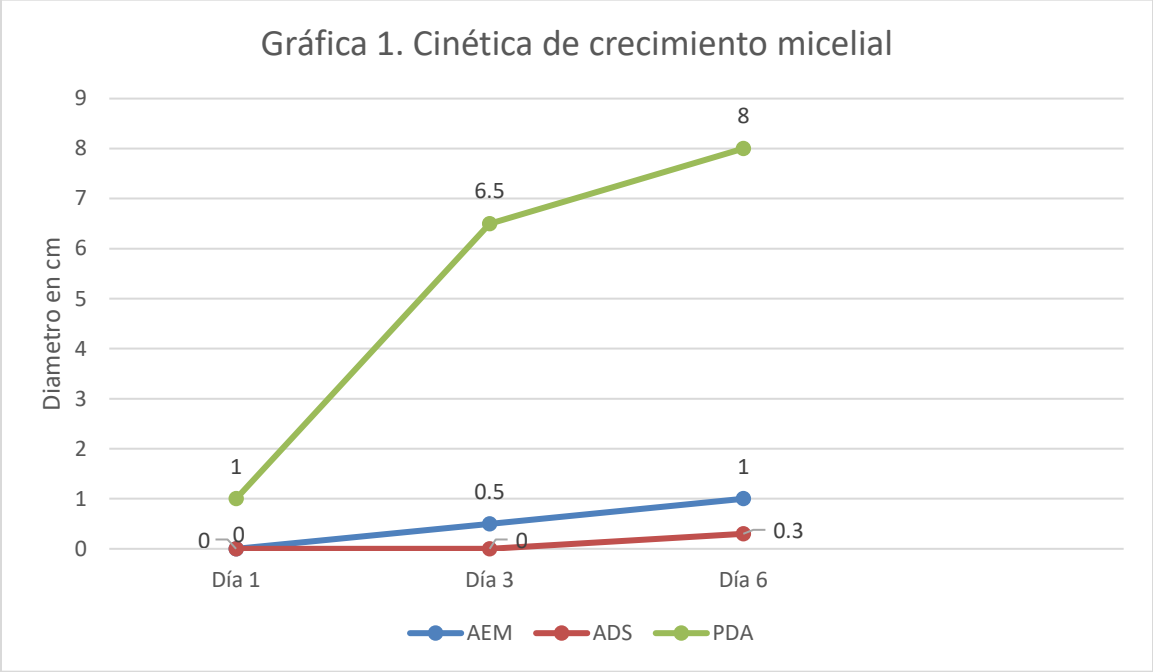
[8] Google maps (2025)

Tabla 1.
Crecimiento Micelial del hongo *Lycoperdon Perlatum* en diferentes medios de cultivo

Tiempo	Tipo de Agar	Observaciones	Imágenes
Día 1	Agar Malta	Inoculación del medio de cultivo por espora del hongo e incubación a 30°C	
	Agar sabouraud	Inoculación por esporas del hongo e incubación a 25°C	
	Agar Papa Dextrosa	Inoculación por esporas del hongo e incubación a 25°C	
Día 6	Agar Malta	Se noto mayor crecimiento de micelio de otras esporas	
	Agar Sabouraud	Poco crecimiento de micelio, casi no perceptible	
	Agar Papa Dextrosa	Se nota el crecimiento de micelio en la mitad de la caja Petri	

El crecimiento de micelio en Agar Malta al día 6 aún no terminaba de desarrollarse, siendo muy pobre el micelio, notándose las ramificaciones miceliales cortas. En el caso del micelio en agar sabouraud este al 6 día aún se notaban las esporas en el agar, siendo pobre y con ramificaciones pequeñas. Para el agar dextrosa papa se notó el crecimiento del micelio en una noche, en este sus

ramificaciones se notan abundantes y grandes. La cinética de crecimiento micelial se realizó midiendo cada 3 dias el micelio del hongo para los tres medios de cultivo en agar. (Gráfica 1)



CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente de los tres medios de cultivo analizados en agar papa dextrosa, agar extracto malta y agar Sabouraud del hongo inoculados por esporas a 30°C se concluye que el micelio del hongo se desarrolló mejor a los 6 días en el medio de cultivo agar papa dextrosa con un diámetro de 8 cm de micelio.

BIBLIOGRAFÍA

1. C. Sanchez “Mexico tierra de hongos” INPI (México, 2022), pp. 1-212
2. N.Dominguez “Pedo de lobo (*Lycoperdon perlatum*)”, CONABIO, 2020
3. M.Bon”Guia de campo de los hongos de España y Europa”., 2004.
4. D. Salmones y G. Mata “Recursos genéticos de macromicetos”, Hongos comestibles y medicinales en Iberoamerica., (Tapachula, Chiapas, 2012), Cap. 2, pp. 79-86
5. Gobierno Municipal Ixtaczoquitlán “Plan de desarrollo municipal” (Ixtaczoquitlan, Veracruz, 2022-2025), pp.70
6. C. Ramesh y M. Pattar, (2010). Antimicrobial properties, antioxidant activity and bioactive compounds from six wild edible mushrooms of western ghats of Karnataka, India. Pharmacognosy Research, Vol. 2, cap. 2, pp. 107-112.
7. H. Umezawa., T. Takeuchi., H. Iinuma., M. Ito., M. Ishizuka., Y. Kurakata., Y. Umeda., Y. Nakanishi., T. Nakamura., A. Obayashi., O. Tanabe. (1975). A NEW ANTIBIOTIC, CALVATIC ACID. The journal of antibiotics, Vol. 28, cap. 1, pp. 87-90.
8. Google maps “Mapa del Estado de Veracruz” (2025).

ALTURA, DIÁMETRO DE TALLO Y GRADOS BRIX EN NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum Spp.*) PARA EL CAMPO CAÑERO MEXICANO

Jazmin Lavin-Castañeda[1,3], Fernando Carlos Gómez-Merino[2], Libia Iris Trejo-Téllez[2], Arturo Pérez Vázquez[1], Gustavo López-Romero[1], José López-Collado[1].

[1]Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, México; [2]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México; [3]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Chetumal, Quintana Roo, México.
lavin.jazmin@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo de gran importancia económica en México, especialmente en la producción de azúcar. Retos relacionados con el cambio climático, plagas y enfermedades y la necesidad de aumentar la productividad, exigen la búsqueda constante de variedades más resistentes y con mayores rendimientos. La evaluación de nuevas variedades de caña de azúcar se presenta como una estrategia clave para enfrentar estos desafíos, garantizando la competitividad y sostenibilidad del sector por región. En este estudio se evaluaron 11 nuevas variedades de caña de azúcar en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, ciclo plantilla en la etapa fenológica de maduración para determinar el comportamiento agroindustrial; como testigos se utilizaron cuatro variedades comerciales (CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431 y Mex 05-204). Todas las mediciones se hicieron a los 13 meses de edad de las plantas, en un diseño completamente al azar con 15 repeticiones en altura, diámetro de tallos molederos y cinco repeticiones para °Brix. Los datos se analizaron en Minitab Versión 21. En alturas de tallos molederos, existieron diferencias significativas entre las 11 variedades y los testigos comerciales, destacando las variedades Mex 09-341 y Mex 09-93 con alturas de 317.6 cm y 298.6 cm, respectivamente, aunque la mejor altura la presentó la variedad Mex 05-204 con 336.6 cm. En cuanto a diámetro de tallos, las variedades Mex 09-289, Mex 09-208, Mex 09-212 y Mex 09-312 presentaron medias más altas, de 33.7, 32.62, 30.47 y 30.26 mm respectivamente, en comparación de CP 72-2086 y Mex 05-204 que presentaron diámetros de 26.3 mm y 25.6 mm. En °Brix las nuevas variedades lograron 19.8 a 18.3, mientras que en las variedades comerciales Mex 69-290 presentó 17.60 °Brix, Mex 79-431 17.7 °Brix y Mex 05-204 15.2 °Brix, respectivamente; con esto, al menos 10 de las nuevas variedades producen más azúcares que los testigos comerciales. Las medias de altura de planta, diámetro de tallo, y medición de °Brix representan variables que demuestran la superioridad de las nuevas variedades frente a los testigos comerciales; las dos primeras para producción de biomasa total y el tercero como criterio de calidad y de cantidad en producción de azúcares. Se recomienda continuar con más evaluaciones en ciclo soca y resoca, para tener un soporte más concreto del comportamiento de estos nuevos materiales, adicional a las evaluaciones que es necesario llevar a cabo en otros ambientes

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es uno de los cultivos agrícolas más importantes en México, representando una fuente clave para la producción de azúcar, bioetanol y otros derivados industriales; así como la generación de empleos. Sin embargo, el sector enfrenta retos críticos derivados del cambio climático, como fluctuaciones en las condiciones de humedad y temperatura, que afectan la productividad y calidad del cultivo (Bonnett *et al.*, 2006). La importancia de desarrollar variedades que presenten resistencia a estas adversidades, así como a plagas y enfermedades comunes, es fundamental para mantener la estabilidad del sector (Guerrero-Carrera *et al*., 2015). En ese sentido, las estrategias de mejoramiento genético y evaluación agroindustrial de nuevas variedades se vuelven una prioridad para los programas de investigación agrícola (Kumar *et al*., 2024). Los avances en mejoramiento genético han permitido el desarrollo de nuevas variedades de

caña de azúcar con características específicas, como mayor altura de tallos, diámetro adecuado para la molienda y mayor concentración de sólidos solubles (grados Brix) (Alemu *et al*., 2018). Estos parámetros están directamente relacionados con la biomasa total y el contenido de sacarosa, dos variables esenciales para la eficiencia del proceso agroindustrial (Tejera *et al*., 2007).
Estudios recientes han mostrado que el mejoramiento varietal puede incrementar el rendimiento de azúcar por hectárea, lo cual es clave para la competitividad en mercados nacionales e internacionales (Da Cruz & Machado, 2023). En México, la evaluación regional de nuevas variedades es importante para identificar aquellas que se adapten mejor a las condiciones agroclimáticas locales, considerando factores como la temperatura y disponibilidad de agua influyen en el desarrollo del cultivo (Brigido-Morales *et al*., 2023). La variabilidad ambiental puede afectar significativamente las características fenotípicas y productivas del cultivo, por lo que la selección definitiva debe considerar múltiples ambientes y años de evaluación (Vinu *et al.,* 2024).

En el presente estudio, se evaluaron once nuevas variedades generadas en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, en comparación con cuatro cultivares comerciales, para determinar el comportamiento agroindustrial.

TEORÍA

El rendimiento de azúcar de la caña de azúcar está determinado por características morfológicas como la altura de los tallos, el diámetro y el contenido de sólidos solubles (°Brix). La altura de los tallos es un componente esencial en la producción de biomasa, ya que a mayor altura se asocia generalmente una mayor capacidad fotosintética y, por tanto, mayor rendimiento por hectárea. El diámetro de los tallos es otro rasgo importante, ya que tallos más gruesos presentan mayor contenido de jugo, lo que favorece la extracción industrial de sacarosa (Gohary, 1991). Además, se ha encontrado que existe una correlación positiva entre el diámetro de tallo y el peso total de la planta, así como con el porcentaje de extracción de jugo, lo cual es clave para mejorar la productividad agroindustrial (Elibox, 2013).

Por otra parte, el contenido de °Brix, indicador de los sólidos solubles totales presentes en el jugo, principalmente sacarosa, representa un criterio importante en la evaluación de calidad agroindustrial. Un mayor contenido de °Brix implica una mayor concentración de azúcares, lo que se traduce en una eficiencia superior durante los procesos de molienda y cristalización en ingenios azucareros. Otros estudios mencionan, que seleccionar variedades con altos valores de °Brix puede aumentar la eficiencia técnica y económica de la producción de azúcar, especialmente en regiones con condiciones agroclimáticas favorables como Veracruz donde mayormente se destina de superficie sembrada (Elibox, 2013). Estas variables, al ser evaluadas de manera conjunta, permiten establecer perfiles productivos más precisos de las variedades de caña de azúcar, facilitando su integración en esquemas de producción más sostenibles y competitivos.

PARTE EXPERIMENTAL

La presente investigación se llevó a cabo en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, localizado en la Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes Veracruz a 18° 85” latitud norte y 96° 84 longitud oeste, a una altitud de 645 m.

Se trabajó con 11 nuevas variedades de caña de azúcar (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341) en ciclo plantilla en la etapa fenológica de maduración para determinar el comportamiento agroindustrial y como testigos se utilizaron cuatro variedades comerciales (CP 72-2086, Mex 69-290, Mex 79-431 y Mex 05-204).

Todas las mediciones se hicieron a los 13 meses después de la siembra (MDS), se utilizó un diseño completamente al azar con 15 repeticiones en las variables altura y diámetro de tallos molederos y cinco repeticiones para solidos solubles totales (°Brix).

Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de Tukey ($p \leq 0.05$) usando el software Minitab Versión 21.

RESULTADOS

En el presente estudio, realizado en ciclo plantilla a los 13 meses después de la siembra, se evaluó la altura de tallos molederos de nuevas variedades de caña de azúcar, observándose diferencias significativas entre ellas. Las variedades que inicialmente destacaron por su altura fueron Mex 09-341 y Mex 09-93, con promedios de 317.6 y 298.6 cm respectivamente, lo que refleja un buen comportamiento en términos de desarrollo vegetativo. No obstante, la variedad que sobresalió por presentar la mayor altura general fue Mex 05-204, alcanzando un promedio de 336.6 cm**,** superando a las nuevas variedades seleccionadas. Este resultado sugiere que Mex 05-204 posee un potencial agronómico superior en cuanto a crecimiento. Por otro lado, la variedad que mostró el desempeño menos favorable fue Mex 09-289, con una altura de tan solo 201.6 cm, indicando un crecimiento más limitado que podría influir negativamente en su productividad (**Figura 1**).

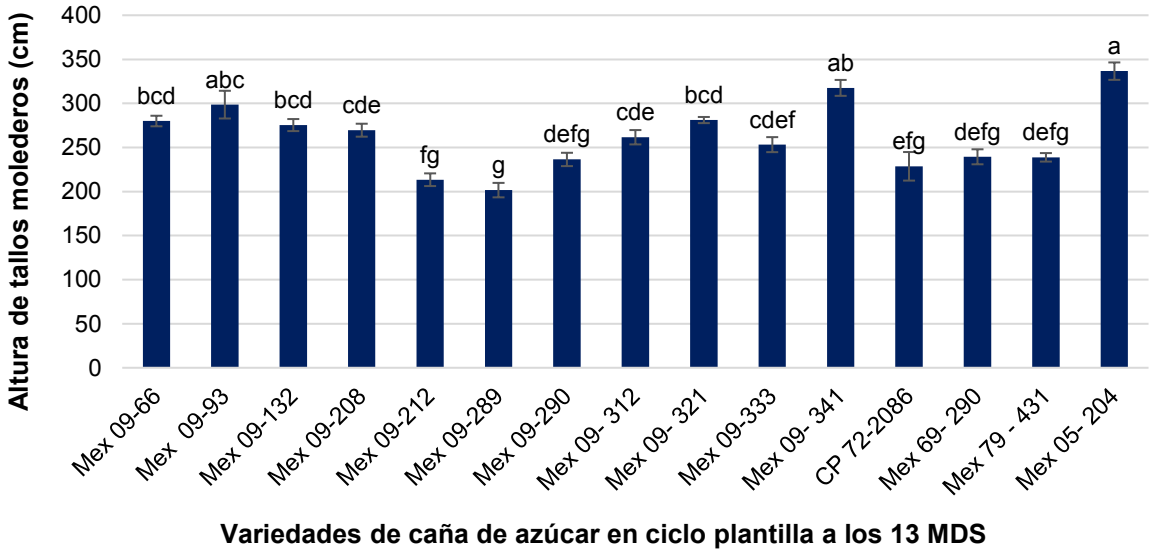


Figura 1. Altura de tallos molederos, en ciclo plantilla a los 13 meses después de la siembra (MDS), de nuevas variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Medias ± DE con letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto al diámetro de los tallos molederos, los resultados obtenidos muestran que la variedad Mex 09-289 destacó al presentar el mayor valor promedio, con 33.77 mm, seguida muy de cerca por Mex 09-208, con un diámetro de 32.62 mm. Ambas variedades superaron notablemente a las variedades testigo, cuyo rango de diámetros osciló entre 25.06 mm y 29.8 mm, como se observa en la **Figura 2**. Estos resultados sugieren un mejor desarrollo estructural de las nuevas variedades, lo cual puede tener un impacto positivo en la eficiencia del proceso de molienda, al ofrecer tallos más gruesos y con mayor contenido potencial de jugo**.**

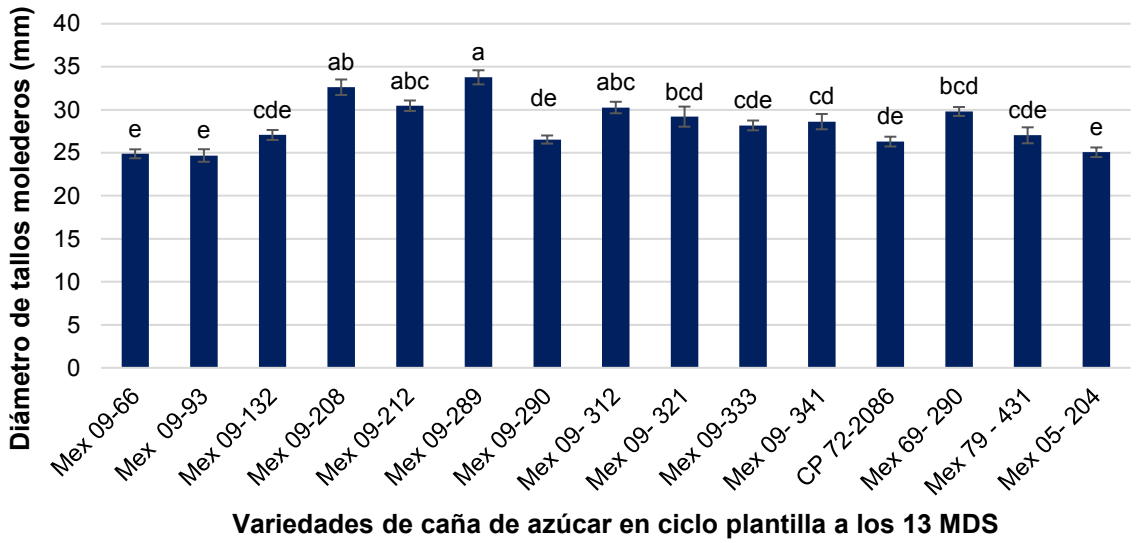


Figura 2. Diámetro de tallos molederos, en ciclo plantilla a los 13 meses después de la siembra (MDS), de nuevas variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Medias ± DE con letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, p ≤ 0.05).

Finalmente, en este estudio también se evaluó la concentración de sólidos solubles en el jugo de caña de azúcar, expresada en grados Brix (°Brix). Se identificaron cinco de las nuevas variedades que presentaron valores superiores en comparación con las variedades testigo. Las variedades con mayor concentración de °Brix fueron Mex 09-333 (19.8 °Brix), Mex 09-321 (19.4 °Brix); Mex 09-289, (19.1 °Brix); Mex 09-341 (19.0 °Brix) y Mex 09-66 (19.0 °Brix), indicando un mayor contenido de azúcares. En contraste, las variedades testigo mostraron valores inferiores, CP 72-2086, (18.2 °Brix), Mex 79-431 (17.7 °Brix), Mex 69-290 (17.6 °Brix) y Mex 05-204 (15.2 °Brix) (**Figura 3**).

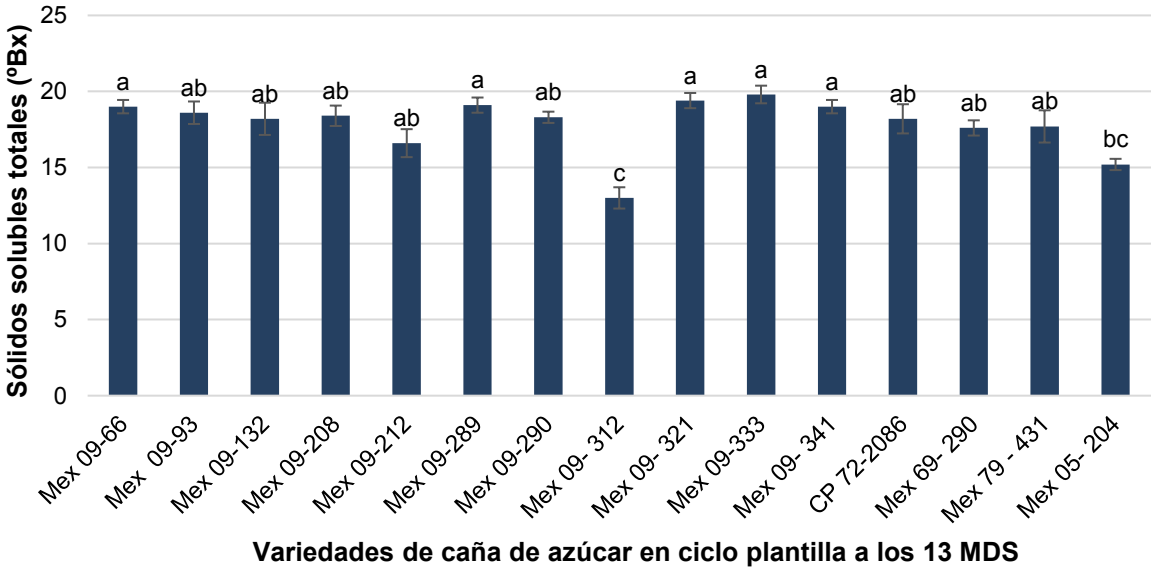


Figura 3. Sólidos solubles totales en tallos molederos, en ciclo plantilla a los 13 meses después de la siembra (MDS), de nuevas variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Medias ± DE con letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, *p* ≤ 0.05).

La variedad que presentó la menor concentración de azúcares fue Mex 09-312, con apenas 13.0 °Brix (**Figura 3**), lo cual podría limitar su potencial industrial. Estos resultados son fundamentales para orientar la selección de materiales con mayor contenido de azúcares, clave para la producción eficiente de azúcar o bioetanol.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que algunas de las nuevas variedades de caña de azúcar evaluadas en ciclo plantilla presentan características agronómicas e industriales superiores en comparación con las variedades testigo. En cuanto a la altura de los tallos molederos, la variedad Mex 05-204 destacó significativamente, lo que indica un alto potencial de crecimiento vegetativo. Por otro lado, el mayor diámetro de tallos fue registrado en Mex 09-289 y Mex 09-208, lo cual podría favorecer una mayor eficiencia en el proceso de molienda por el mayor volumen de jugo disponible. Respecto al contenido de sólidos solubles (°Brix), las variedades Mex 09-333, Mex 09-321 y Mex 09-289 mostraron las concentraciones más altas, superando a todas las variedades testigo. Estos hallazgos resaltan el valor de estas nuevas variedades para su posible incorporación en el sector cañero, orientados a optimizar tanto el rendimiento agrícola como la calidad y cantidad del jugo para la industria azucarera. Se recomienda continuar con más evaluaciones en ciclo soca y resoca, para tener un soporte más concreto del comportamiento de estos nuevos materiales, adicional a las evaluaciones que es necesario llevar a cabo en otros ambientes.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. E. Gohary, “Indirect selection for increased sucrose yield in early sugarcane testing stages”, Field Crops Res., Vol. 26, 1, 1991, pp. 67-73.
2. G. Bonnett, M. L. Hewwitt, D. Glassop, “Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes”, Aust. J. Agric. Res., Vol. 57, 10, 2006, pp. 1087-1095.
3. J. G. Brígido-Morales, L. Nikolskii-Gavrilov, O. L. Palacios-Vélez, R. Soto-Ortíz, S. M. Avilés-Marín, M. I. Escobosa-García, “Impact of climate change on rainfed sugarcane in Veracruz, Mexico” AgroProd., Vol. 11, 2023, pp. 23-35.
4. J. Guerrero-Carrera, C. Landeros-Sánchez, J. P. Martínez-Dávila, G. López-Romero, I. Nikolskii-Gavrilov, J. M. Hernández-Pérez, A. Soto-Estrada, “Climate change impact on sugarcane crop in the Gulf of Mexico: a farmers perception and adaptation measures”, J. Agric. Sci., 7, 10, 2015, pp. 140-140.
5. N. A. Tejera, R. Rodés, E. Ortega, R, Campos, C. Lluch “Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars”, Field Crops Res., Vol. 102, 1, 2007, pp. 64-72.
6. S. Alemu, H. Mohammed, F. Tadesse. “Correlation of traits on sugarcane (*Saccharum* spp) genotypesat Metahara Sugar Estate”, Int. J. Adv. Res. Biol. Sci., Vol. 5, 3, 2018, pp. 1-5.
7. T. Kumar, J-G. Wang, C-H. Xu, X. Lu, J. Mao, X-Q. Lin, C-Y. Kong, C-J. Li, X-J. Li, C-Y. Tian, M. H. M. Ebid, X-L. Liu, H-B. Lui, **“**Genetic engineering for enhancing sugarcane tolerance to biotic and abiotic stresses”, Plants., Vol. 13, 13, 2024, 1739.
8. T. V. Da Cruz, R. L. Machado, “Increasing sugarcane production eco-efficiency: a DEA analysis with different sugarcane varieties”, Sustainability., Vol. 15, 14, 2023, 11201.
9. V. Vinu, S. Alarmelu, K. Elayaraja, C. Appunu, G. Hemaprabha, S. Parthiban, K. Shanmugasundaram, R. Rajamadhan, K. G. Saravanan, S. Kathiravan, B. Ram, V. Vinayaka, M. K. C. Varatharaj, “Multi-environment analysis of yield and quality traits in sugarcane (*Saccharum* sp.) through AMMI and GGE biplot analysis”, Sugar Tech., Vol. 27, 11, 2024.
10. W. Elibox, “Associations between yield and quality parameters in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids) towards the development of multipurpose clones”, Trop. Agric., Vol. 90, 3, 2013, pp. 1-11.

CARACTERIZACION MOLECULAR Y MICELIAL DE UNA CEPA AMARILLA DEL GÉNERO *Pleurotus*

Mariana Hernández-Villanueva, Gustavo Valencia-del Toro, Fabiola Rodríguez-Evangelista, Leticia Aguilar-Doroteo, Angélica Cruz-Solorio

Instituto Politécnico Nacional (UPIBI), Barrio la Laguna Ticomán, CDMX. 07340, México.
ancruzs@ipn.mx

RESUMEN

Los hongos comestibles del género *Pleurotus* son un excelente alimento debido a sus propiedades nutricionales que le dan un alto valor culinario y además presentan diversas aplicaciones biotecnológicas por la capacidad de generar productos metabólicos de interés industrial. Sin embargo, una de las especies de este género poco estudiada es *P. citrinopileatus*, una seta amarilla. Por consiguiente, es necesario trabajar en investigaciones para incrementar el conocimiento de más especies de hongos comestibles y así favorecer e incitar su cultivo, para ello en este trabajo se realizó la caracterización micelial y molecular de una seta amarilla del género *Pleurotus* en medio sólido y grano, así como su identificación molecular. El crecimiento micelial en medio sólido tardó 8 días, en cambio el crecimiento en trigo fue en 16 días. Con respecto a los parámetros cinéticos, la cepa amarilla presentó una velocidad máxima de crecimiento de 12.04 mm/día y una fase de latencia de 0.52 días en medio sólido, mientras que en trigo fue de 11.25 cm^3/día y 1.76 días, respectivamente. Por otra parte, se logró identificar molecularmente la cepa amarilla como *Pleurotus citrinopileatus*. En conclusión, este trabajo es un aporte de conocimientos a investigaciones relacionadas a hongos comestibles de *P. citrinopileatus*.

INTRODUCCIÓN

Los hongos comestibles del género *Pleurotus* son un excelente alimento debido a sus propiedades nutricionales y por la capacidad de generar productos metabólicos de interés industrial con aplicaciones biotecnológicas (Lesa et al., 2022). La seta amarilla del género *Pleurotus,* conocida como *P. citrinopileatus,* ha ganado interés no solo por su atractivo color y sabor delicado, sino también por su perfil nutricional y propiedades funcionales, lo que le confiere como alimento funcional y nutracéutico debido al contenido de compuestos bioactivos como polisacáridos, antioxidantes y proteínas de alta calidad (Reis et al., 2017). Ramírez-Gómez (2009) define a los alimentos funcionales como: “aquellos alimentos que además de su contenido nutrimental, aportan beneficios a la salud”, porque contienen sustancias que desempeñan una acción específica en las funciones fisiológicas del organismo.

Por otro lado, la producción de la seta amarilla representa una alternativa sostenible, desde el punto de vista ambiental como económico, especialmente en regiones con recursos agrícolas, adaptándose a residuos agroindustriales como el bagazo de caña, aserrín, paja de trigo y cascarilla de café (Mane et al., 2007). Sin embargo, para mantener las propiedades, antes mencionadas, en el hongo cultivado es fundamental generar un inóculo sano y vigoroso que asegure una colonización eficiente del sustrato, este tipo de inóculo consiste en granos (como trigo, sorgo o mijo) esterilizados e inoculados con micelio, que luego se utiliza para colonizar sustratos lignocelulósicos en el cultivo comercial, por lo que la calidad del inóculo es determinante para el éxito del cultivo, debido a que influye directamente en la velocidad de colonización, el rendimiento biológico y la sanidad del cultivo (Stamets, 2000).

El uso de grano como soporte del inóculo ofrece ventajas significativas, por un lado, los granos contienen almidones, lípidos y proteínas que favorecen el desarrollo vigoroso del micelio; y además, su textura y porosidad permiten una buena aireación y una distribución homogénea del hongo cuando se transfiere al sustrato definitivo (Royse, 2003). Desde el punto de vista práctico, la producción de inóculo en grano permite reducir los tiempos de incubación del sustrato principal, lo

cual disminuye la probabilidad de contaminación por microorganismos competidores. Asimismo, facilita la estandarización de procesos en sistemas de producción comercial y permite conservar cepas en estado viable para futuras siembras, si se almacena en condiciones adecuadas (Zervakis et al., 2001).

Por consiguiente, es necesario trabajar en investigaciones para incrementar el conocimiento de más especies de hongos comestibles y así favorecer e incitar su cultivo, para ello en este trabajo se realizó la caracterización micelial y molecular de una seta amarilla del género *Pleurotus* en medio sólido y grano, así como su identificación molecular.

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico
Como material biológico se trabajó con una cepa comercial amarilla del género *Pleurotus* (Figura 1), la cual se encuentra depositada en la colección fúngica del Laboratorio de Cultivos Celulares de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología perteneciente al Instituto Politécnico Nacional.

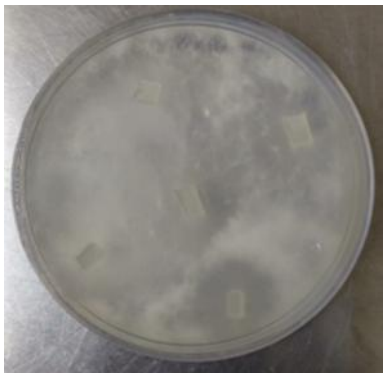


Figura 1. Cepa amarilla del género *Pleurotus* crecida en medio sólido.

Crecimiento micelial de la seta amarilla en medio de cultivo sólido
Se prepararon cajas Petri con medio sólido EMA (extracto de malta-agar) para realizar el crecimiento micelial de la cepa comercial amarilla. Para ello se colocó un disco con un diámetro de 6 mm aproximado invadido de micelio en el centro de la caja Petri con medio sólido EMA. Posterior a las 24 horas se realizaron mediciones diariamente del crecimiento micelial con ayuda de un vernier digital Leidsany hasta que el micelio invadió completamente la caja (Figura 2). Este procedimiento tuvo 10 replicas.

Figura 2. Medición del crecimiento micelial de la cepa amarilla.

Crecimiento micelial de la seta amarilla en grano.
Para llevar a cabo el procedimiento del crecimiento micelial en grano, como primer paso se hidrato el trigo por 24 h, transcurrido ese tiempo se escurrió y se colocaron 110g de trigo hidratado en un

frasco de vidrio. Posteriormente se esterilizó en la autoclave a 15 psi por 50 min. Una vez enfriado el frasco con el trigo estéril, se colocó un disco de agar (diámetro aproximado de 40 mm) invadido de micelio en la parte superior del frasco, y al cerrar el frasco, se incubó a 28°C. La medición del crecimiento micelial se realizó cada 24 h con ayuda de un vernier digital Leidsany hasta que el micelio invadió todo el frasco (Figura 3). Este procedimiento tuvo 10 replicas.

Figura 3. Medición del crecimiento micelial de la cepa amarilla en grano.

Identificación molecular de la cepa amarilla
Para la parte molecular se preparó medio de cultivo líquido (extracto de malta y sacarosa). Posteriormente se esterilizó en la autoclave a 15 psi por 50 min. El medio liquido estéril fue inoculado con fragmentos de agar con micelio de la cepa amarilla e incubado a una temperatura de 28ºC durante una semana, al transcurrir ese lapso, la biomasa obtenida se usó para la extracción de ADN.

Extracción de ADN
El método utilizado para la extracción de ADN fue el descrito por Dellaporta et al. (1983) y Morales (2011) con algunas modificaciones. Se tomó micelio fresco proveniente de frascos con medio líquido, el cual fue colocado en un mortero con nitrógeno líquido y macerado hasta obtener una mezcla homogénea. A continuación, se añadieron 800 µL de buffer CTAB previamente calentado a 60 °C, con el objetivo de disolver la membrana celular y liberar los ácidos nucleicos. Esta mezcla fue transferida a un tubo Eppendorf donde se incorporaron 2.5 µL de β-mercaptoetanol.

La muestra se incubó durante 30 minutos a 65 °C, mezclándose por inversión cada 10 minutos. Posteriormente, se añadió cloroformo:alcohol isoamílico (24:1) en proporción volumen:volumen (v:v), se agitó en vortex durante 3 minutos y se centrifugó a 15,000 rpm por 5 minutos. Este paso permitió la separación en dos fases: una fase acuosa superior que contenía los ácidos nucleicos, y una fase orgánica inferior con proteínas y lípidos disueltos.

El sobrenadante (fase acuosa) fue transferido a un nuevo tubo, al cual se agregaron 5 µL de RNasa para degradar el ARN y obtener una muestra de ADN libre de impurezas. Se mezcló nuevamente en vortex durante 3 minutos y se incubó a 37 °C por 30 minutos. Luego, se repitió la extracción con cloroformo:alcohol isoamílico (24:1), agitando durante 3 minutos y centrifugando a 15,000 rpm por 5 minutos. El sobrenadante resultante fue transferido a un nuevo tubo.

Para precipitar el ADN, se añadieron entre 15 y 30 µL de acetato de sodio 5 mM y dos tercios del volumen de isopropanol, ambos previamente enfriados a 4 °C. La mezcla se incubó a –20 °C durante 30 minutos y se centrifugó nuevamente a 15,000 rpm por 5 minutos. El pellet formado fue conservado, y para su lavado se agregaron 800 µL de etanol frío al 70 %, dejando reposar durante 5 minutos antes de centrifugar a 15,000 rpm por 1 minuto. Este lavado con etanol al 70 % se repitió una vez más. Finalmente, el ADN fue resuspendido en 100 µL de solución amortiguadora TE, con el fin de evitar su degradación.

Electroforesis en gel
Para verificar la presencia de ADN, se preparó un gel de agarosa al 1.2 % utilizando tampón TBE como base. En cada pozo del gel se cargaron 5 µL del ADN extraído, 3 µL de buffer de carga (6X) y 3 µL del revelador GelRed (1000X). Como marcador molecular se utilizó 1 µL de Lambda Hind III (Sigma). La electroforesis se llevó a cabo a 90 V durante una hora, utilizando una fuente de poder. Finalmente, el gel fue visualizado y documentado mediante el sistema de fotodocumentación ChemiDoc™ MP Imaging System (Bio-Rad).

Amplificación de ADN
Una vez verificada la presencia de ADN en el gel, se realizó la amplificación del ADN, se logró una secuencia específica de ADN durante varios ciclos, mediante la región de los espaciadores internos transcritos (Internal Transcribed Spacer) ITS1 e ITS4. Se preparó una reacción de 26 µL, conteniendo lo siguiente: 20 µL de mix de PCR, 1 µL ITS1, 1 µL ITS4 y 4 µL de la muestra de ADN y un blanco. Esta reacción se colocó en un termociclador (Surecycler 8800, Agilent Technologies), de acuerdo con las condiciones del Cuadro 1.

Posteriormente, el producto de la reacción se sometió a una electroforesis en un gel de agarosa al 1% a base de TBE a 60 V durante 45 min. Los pozos de este gel fueron cargados con 5 µL de la mezcla PCR, 3 µL de buffer de carga 6X, 3 µL de revelador Gel Red y 1 µL de 100 pb como marcador de peso molecular. Asimismo, el gel se observó en el fotodocumentador mencionado anteriormente. Una vez confirmada la electroforesis se cuantificó la concentración de ADN leyendo cada tubo en el nanodrop

Cuadro 1. Condiciones de amplificación de ADN.

	Temperatura	Tiempo
Desnaturalización inicial	95ºC	5 min
Desnaturalización	94ºC	30 s (30 ciclos)
Alineamiento	51ºC	30 s
Extensión	72ºC	1 min
Extensión final	72ºC	10 min
Conservación	4ºC	∞

Secuenciación
Para la secuenciación, se prepararon 120 nanogramos de ADN amplificado en un volumen final de 16 µL. Una vez identificado el fragmento de interés, este fue purificado y enviado para su secuenciación a la Unidad de Síntesis y Secuenciación del Instituto de Biotecnología de la UNAM. Los resultados obtenidos fueron alineados y analizados utilizando los programas BioEdit Sequence Alignment Editor y MEGA, a fin de determinar la secuencia consenso. Posteriormente, esta secuencia fue comparada con las disponibles en la base de datos GenBank del National Center for Biotechnology Information (NCBI) mediante la herramienta BLAST.

RESULTADOS

Crecimiento micelial de la seta amarilla en medio sólido
El crecimiento micelial de la cepa amarilla en medio sólido tardó 8 días (Figura 4). En investigaciones anteriores, Rojas-Barreto (2014) informó que para *P. ostreatus* y *P. pulmonarius* alcanzó la colonización completa de todo el medio de cultivo sólido a los 10 días. Esto puede deberse a la diferente composición de los medios de cultivo.

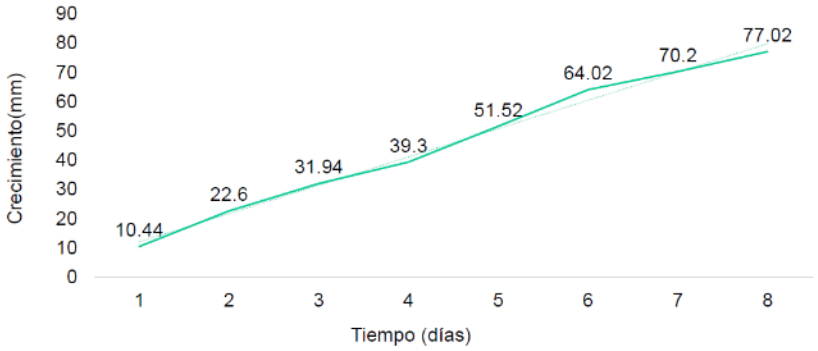


Figura 4. Crecimiento micelial de la cepa amarilla en medio sólido.

A partir de los resultados del crecimiento micelial, se obtuvieron parámetros cinéticos ajustados a tres diferentes modelos matemáticos: Lineal, Logístico y Baranyi. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de los parámetros cinéticos como la velocidad máxima de crecimiento (μmax) y la fase de latencia (λ), el modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el modelo de Baranyi con un 1.80 de error, resultados similares se han reportado por Álvarez et al. (2021) al indicar una una μmax de 13.818 mm/día para cepas del género *Pleurotus*. En otro estudio, Valenzuela et al. (2020a) reportaron valores de μmax de 8.11 a 10.73 mm/día para cepas del género *Pleurotus*.

Cuadro 2. Parámetros cinéticos de la cepa amarilla en medio sólido.

Modelo	μmax (mm/día)	λ (días)	error
Lineal	9.43 ± 0.10	3.73 ± 1.09	2.69
Logístico	12.04 ± 0.74	0.57 ± 0.09	2.25
Baranyi	10.25 ± 0.57	0.52 ± 0.04	1.80

Cada uno de los datos presenta media ± desviación estándar para 10 réplicas

Para la fase de adaptación, el que tomó menos tiempo en que la cepa amarilla adoptara las condiciones en el medio de cultivo EMA fue en el modelo de Baranyi tardando 0.52 días. Valenzuela et al. (2017) indicaron valores de fase de latencia en un intervalo de 0.42 a 2.89 días para diferentes cepas de *Pleurotus*. De acuerdo con Rojas (2013), la composición de los medios de cultivo influye en las velocidades de crecimiento micelial.

Con respecto al modelo logístico, se obtuvo una mayor velocidad máxima de crecimiento con valor de 12.04 mm/día, este resultado se encuentra dentro de los intervalos reportados por Álvarez (2021) y por Valenzuela et al. (2020b) con valores de 7.41 a 15.91 mm/día y de 7.46 a 23.49 mm/día), respectivamente. Así mismo, la velocidad de crecimiento de acuerdo con el modelo lineal presento un valor de 9.43 mm/ día, el cual también se encuentra entre los valores de 5.93 a 11.64 mm/día reportados por Álvarez (2021) y Valenzuela et al. 2021 (5.77 a 9.69 mm/día).

Crecimiento micelial de la seta amarilla en grano

En la Figura 5 se presentan los resultados del crecimiento micelial en grano, el micelio de la cepa amarilla tardo en invadir el trigo en 16 días con una velocidad de crecimiento micelial de 8.4 cm^3/día. En estudios previos, se ha reportado que *Pleurotus citrinopileatus* tardó 17 días para colonizar completamente el trigo (Rózsa *et al*., 2017). En otro estudio, Toledo et al. (2017) indicaron una colonización del trigo en 18 días por el micelio de *Pleurotus ostreatus*.

Por otro lado, en el Cuadro 3 se presentan los valores obtenidos de los parámetros cinéticos, ajustados a los tres modelos antes mencionados, de la cepa amarilla crecida en el trigo. El modelo ajustado a los datos de crecimiento micelial en grano fue el modelo de Baranyi con un error de 2.53. En cambio, la mayor velocidad máxima de crecimiento en trigo se obtuvo con el modelo Logístico

con un 11.25 cm^3/día, por el contrario, Álvarez (2020) reporta crecimiento micelial en trigo de 7.89 y 11.68 cm^3/día en cepas del género *Pleurotus*.

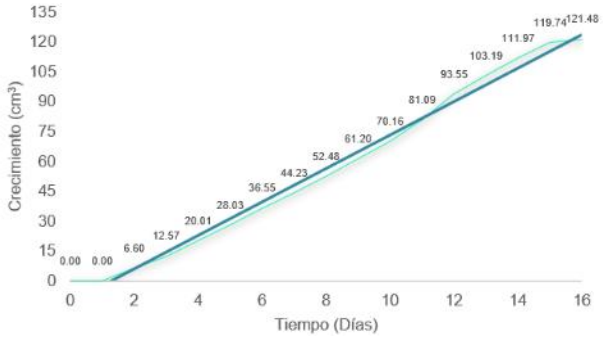


Figura 5. Crecimiento micelial de la cepa amarilla en grano.

De acuerdo con el modelo de Baranyi, la menor fase de adaptación de la cepa amarilla en el trigo fue de 1.76 días. En investigaciones previas, Valenzuela et al. (2017) indicaron un intervalo de fase de latencia en trigo entre 0.07 a 0.14 días. Las diferencias entre los resultados de esta investigación y los autores citados pueden explicarse en términos del sustrato utilizado (grano), debido a "que los sustratos que tienen una mayor colonización del micelio son aquellos que tienen un alto contenido de carbohidratos estructurales, como el maíz y el trigo", como lo reporta Rivera et al. (2013).

Cuadro 3. Parámetros cinéticos de la cepa amarilla en grano.

Modelo	μmax (cm^3/día)	λ (días)	error
Lineal	8.38 ± 0.78	-7.84 ± 6.94	4.44
Logístico	11.25 ± 1.6	2.97 ± 1.29	4.20
Baranyi	9.08 ± 1.22	1.76 ± 1.05	2.53

Cada uno de los datos presenta media ± desviación estándar para 10 réplicas

Por otro lado, existen otros factores que influyen en el crecimiento micelial, como es el tamaño y la dureza del grano, debido a que al micelio le tomara más tiempo llegar al núcleo del grano, donde se concentran los nutrientes más importantes, y colonizarlo por completo, la cáscara también puede dificultar ese acceso. Por ello, es preferible utilizar granos pequeños y blandos, ya que ofrecen más puntos de inoculación y permiten una colonización más rápida por parte del micelio (Morales et al., 2023).

Identificación molecular de la seta amarilla

Con respecto a la caracterización molecular, se logró extraer el DNA de la cepa amarilla que corresponde a un tamaño aproximado de 23,130 pares de bases (Figura 6). De acuerdo con Morales (2011), se obtuvo un tamaño superior a 23,130 pares de bases en la extracción de ADN de cepas de *Pleurotus* spp. De manera similar, Maldonado (2007) reportó que el ADN genómico extraído presentaba un alto peso molecular, con un rango de entre 18,000 y 30,000 pares de bases en cepas del mismo género.

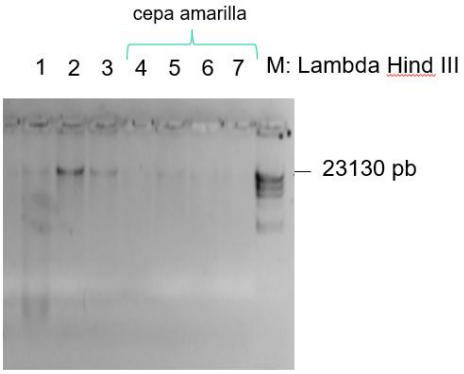


Figura 6. Extracción de ADN de la cepa amarilla.

Amplificación de ADN

Una vez corroborado que el ADN era de buen peso molecular, se realizó la amplificación de ADN con las condiciones antes descritas. En la Figura 7 se observa el amplicon de 700 pb.

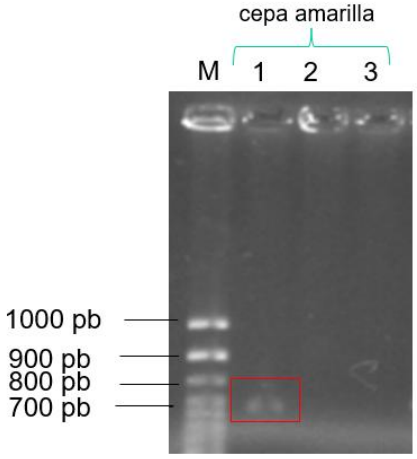


Figura 7. Amplificación del ADN de la cepa amarilla

El ADN obtenido fue amplificado utilizando los iniciadores universales ITS1 e ITS4, dirigidos a la región interna transcrita (ITS) específica de hongos. Se verificó la amplificación del ADN correspondiente al pozo 1 (Figura 7), y al comparar la banda obtenida con el marcador molecular de 100 pb, se estimó un tamaño aproximado de 700 pares de bases. Este tamaño de amplicón es consistente con lo reportado por Imtiaj et al. (2013) quienes obtuvieron fragmentos de entre 600 y 800 pb en cepas de diferentes especies de *Pleurotus* (*P. djamor*, *P. cornucopiae*, *P. ostreatus*, *P. eryngii*). Por lo tanto, el número de pares de bases obtenido en este estudio se encuentra dentro del rango característico del género *Pleurotus*. De manera similar, Sánchez (2016) reportó un fragmento de aproximadamente 700 pb en *C. lutescens* utilizando el mismo par de iniciadores (ITS1-F/ITS4), lo cual confirma que el ADN amplificado corresponde a una región comúnmente conservada en hongos.

Secuenciación

Una vez confirmada la presencia del amplicón, la concentración del ADN de la cepa amarilla fue de 328.7 ng/µL. Las muestras fueron preparadas según los protocolos establecidos por la Unidad de Síntesis y Secuenciación de DNA. Tras la secuenciación, los datos fueron procesados con los programas BioEdit y MEGA. Posteriormente, se realizó un análisis BLAST comparando las secuencias obtenidas con la base de datos GenBank del NCBI. Como resultado, se logró la

identificación molecular de la seta amarilla, determinándose que corresponde a la especie *Pleurotus citrinopileatus* con un 100 % de identidad, como se muestra en la Figura 8.

Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
Pleurotus citrinopileatus voucher SR1577 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA ge...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	579	MN686263.1
Pleurotus citrinopileatus YVL1 genes for ITS1, 5.8S rRNA, ITS2, partial and complete sequence	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	635	LC602507.1
Pleurotus citrinopileatus isolate CCPF5114 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA g...	Pleurotus citrinop...	134	234	100%	6e-27	100.00%	572	MK757154.1
Pleurotus citrinopileatus strain DMRP-36 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RNA gen...	Pleurotus citrinop...	134	225	96%	6e-27	100.00%	515	MK542624.1
Pleurotus citrinopileatus strain 145 internal transcribed spacer 1, 5.8S ribosomal RNA gene, and internal transcrib...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	586	KX688470.1
Pleurotus citrinopileatus strain 147 internal transcribed spacer 1, 5.8S ribosomal RNA gene, and internal transcrib...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	587	KX688469.1
Pleurotus citrinopileatus small subunit ribosomal RNA gene, partial sequence; internal transcribed spacer 1, 5.8S ...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	823	MH234514.1
Pleurotus citrinopileatus voucher ZJ0001CE05 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RN...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	585	KU836569.1
Pleurotus citrinopileatus voucher ZJ0001CE03 internal transcribed spacer 1, partial sequence; 5.8S ribosomal RN...	Pleurotus citrinop...	134	229	100%	6e-27	100.00%	584	KU836567.1

Figura 8. Porcentaje de identidad de la cepa amarilla como *Pleurotus citrinopileatus.*

CONCLUSIONES

En conclusión, el estudio del crecimiento micelial de la seta amarilla permitió obtener parámetros precisos de su desarrollo en medio sólido y en grano de trigo, destacando que el modelo de Baranyi fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales. Además, se logró identificar la cepa comercial amarilla como *P. citrinopileatus*, lo que contribuye al conocimiento taxonómico y al aprovechamiento biotecnológico de esta especie.

BIBLIOGRAFÍA

1. E. D Álvarez, L. Aguilar, G. Valencia del Toro, A. Cruz, M.E. Garín, A. Sánchez, “Modelación matemática del crecimiento micelial y evaluación de los parámetros cinéticos de cepas del género *Pleurotus*”, XVII encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, 2021.
2. S.L. Dellaporta, J. Wood, J.B. Hicks, “A plant DNA Minipreparation: Version II”, Plant Mol. Biol. Rep., 1(4), 1983, pp.19-21.
3. A. Imtiaj, T.S. Lee, S. Ohga, “Sequence variation of *Pleurotus* species collected from Eastern Asia”, Micol Apl Int.,23: 2011, pp.1-13.
4. K. N. Lesa, “Nutritional Value, Medicinal Importance, and Health-Promoting Effects of Dietary Mushroom (*Pleurotus ostreatus*)”, J. Food Qual.,1, 2022, 2454180.
5. Y.I. Maldonado, “Obtención de cepas híbridas de *Pleurotus spp.* por apareamiento de neohaplontes compatibles”. Tesis Maestria en Ciencias en Bioprocesos. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, 2007.
6. V. P. Mane, S. S. Patil, A. A. Syed, M. M. V. Baig, “Biological efficiency and nutritional contents of *Pleurotus citrinopileatus* on different substrates”, World J. Agric. Res., 3(5), 2007, pp. 684–686.
7. B. V. Morales, “Determinación de patrones genéticos de cepas parentales e híbridas de *Pleurotus spp*”. Tesis de Maestría en Ciencias Bioprocesos. UPIBI IPN, 2011.
8. S. Morales, A. Hernández, “Evaluación del crecimiento micelial de cepas de *Pleurotus* spp. en diferentes granos”. Revista de divulgación de la ciencia. 23: 2023, pp. 1-5.
9. X. Ramírez-Gómez, “Alimentos Funcionales, Etnobotánica y Nutrición”, Ide@s CONCYTEG, 49 (4):2009, pp. 787-791.
10. F. S. Reis, L. Barros, A. Martins, I. C. F. R. Ferreira, “Chemical composition and nutritional value of the most widely appreciated cultivated mushrooms: An inter-species comparative study”, Food Chem Toxicol, 109, 2017, pp. 195–204.
11. O. R. L. Rivera, C. A. Martínez, V.S. Morales, “Evaluación de residuos agrícolas como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus”*. Revista Luna Azul, 37, 2013, pp. 89-100.
12. J. A. Rojas-Barreto, A. Hormaza-Anaguano, “Evaluación del crecimiento y compatibilidad de hongos de la podredumbre blanca”. *Ciencia en Desarrollo*, *5*(2),2014, pp. 197-205.

13. L. Rojas, “Los basidiomicetos: una herramienta biotecnológica promisoria con impacto en la agricultura”, Fitosanidad*, 17*(1), 2013, pp. 49-55.
14. D. J. Royse, “Cultivation of oyster mushroom”. Pennsylvania State University Cooperative Extension Bulletin. 2003.
15. M. Rózsa, M. Apahidea, T. Gocan, “Estudio del micelio de setas ostra dorada *Pleurotus citrinopileatus* Singer” Universidad de Ciencias Agrícolas y Medicina Veterinaria, Cluj-Napoca, Rumania, 2017.
16. L. Sánchez, “Identificación y caracterización de hongos de interés para su uso industrial y, en especial, en la industria alimentaria mediante el uso de métodos moleculares”,Grado en Innovación en procesos y productos alimentarios, Universidad Pública de Navarra, 2016.
17. P. Stamets, “Growing gourmet and medicinal mushrooms*”* (3rd ed.). Ten Speed Press.
18. C.V. Toledo, C. Barroetaveña, “Crecimiento miceliar de especies silvestres de hongos comestibles de los bosques andino-patagónicos: primeros pasos para su domesticación”, Bol. Soc. Argent. Bot., *52*(3), 2017, pp. 435-446.
19. J.D Valenzuela-Cobos., A. Grijalva-Endara, R. Marcillo-Vallejo, M.F. Garcés-Moncayo, “Producción y caracterización de cepas reconstituidas de *Pleurotus* spp. cultivadas en diferentes residuos agrícolas”. Rev. Mex. Ing. Quim., 19(3), 2020a, pp. 1493-1504.
20. J.D., Valenzuela-Cobos, R.O. Rodriguez-Grimon, M.L. Jara-Bastidas, A. Grijalva-Endora, D.C. Zied, M.E. Garín-Aguilar, G. Valencia del Toro, “Modelamiento de crecimiento micelial de cepas parentales, hibridas y reconstituidas de *Pleurotus* y *Lentinula*”. Rev. Mex. Ing. Quim., 19(1), 2020b, pp. 165-174.
21. J. D. V., Valenzuela-Cobos, E Duran-Páramo, M. E. Garin-Aguilar, A. SAnchez-Hernández, H. Leal-Lara, G. Valencia-del Toro, G. V. “Production of hybrid strains among Pleutorus and Lentinula and evaluation of their mycelial growth kinetics on malt extract agar and wheat grain using the Gompertz and Hill models”, Emir. J. Food Agric., *29*(12), 2017, pp. 927-935.
22. G. I. Zervakis, A. Philippoussis, S. Ioannidou, P. Diamantopoulou, “Mycelium growth kinetics and optimal temperature conditions for the cultivation of edible mushroom species on lignocellulosic substrates”, Folia Microbiologica, 46(3), 2001, pp. 231–234.

LANTANO EN EL NÚMERO DE HOJAS Y EL ÁREA FOLIAR DE TRES VARIEDADES DE ALCATRAZ

Nadia Issaí Torres-Flores[1], Libia Iris Trejo-Téllez[1], Fernando Carlos Gómez-Merino[1], Yolanda Leticia Fernández Pavía[1], María Guadalupe Peralta-Sánchez[1]

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México, México. C. P. 56264.
nadia.torres@colpos.mx

RESUMEN

En México el alcatraz de color (Zantedeschia spp.) tiene diversos usos y gran aceptación, aunque poca difusión. Por otra parte, elementos benéficos como el lantano (La) pueden detonar efectos positivos en plantas cuando se aplican a bajas concentraciones. El número de hojas y el área foliar son indicadores importantes de crecimiento vegetal, captación de luz y eficiencia fotosintética5. Esta investigación evaluó la aplicación de dos fuentes de La [La(NO3)3 6H2O y LaCl3] y cuatro concentraciones (0, 10, 20 y 30 □M) aplicados en el ciclo productivo con la solución nutritiva de riego en las variables número de hojas y área foliar de variedades de alcatraz (Gold Fever, Regal y Garnet Glow). Por variedad se condujo un experimento factorial 2 × 4. La unidad experimental fue un rizoma en una bolsa de polietileno negro conteniendo tezontle como sustrato. Cada variedad tuvo ocho tratamientos con seis repeticiones. En la cosecha se determinó el número de hojas y el área foliar. Los efectos principales de los factores evaluados fueron significativos en el número de hojas y en el área foliar. Al aplicar 20 □M LaCl3 se aumentó el número de hojas en Gold Fever 32% respecto al tratamiento sin La; mientras que, 30 □M La(NO3)3 6H2O aumentó en 68 y 100% esta variable en Garnet Glow y Regal, respectivamente. En lo que se refiere al área foliar, se registraron incrementos de 127% en Gold Fever tratada con 20 □M LaCl3, de 230% en Regal con el tratamiento 30 □M La(NO3)3 6H2O y de 125% en Garnet Glow con 30 □M LaCl3, en todos los casos con respecto al tratamiento sin La. El suministro entre 20 y 30 □M La, independientemente de la fuente empleada, incrementa las variables número de hojas y área foliar en las tres variedades de alcatraz evaluadas.

INTRODUCCIÓN

En México el alcatraz de color (*Zantedeschia* spp.) tiene diversos usos y gran aceptación, aunque poca difusión (Corr *et al*., 1991; Cruz *et al.,* 2001). Es una ornamental que pertenece a la familia Araceae; que se ha convertido en los últimos años en una interesante opción productiva para el país (Sánchez *et al*., 2001), es una planta que presenta características atractivas al consumidor como espata vistosa y follaje moteado, con una amplia gama de colores cultivada como plantas de jardín y como flores de corte (Bahamonde, 2006). El suministro de fertilizantes en alcatraz de color se basa en recomendaciones de otros países, lo que ocasiona un déficit o exceso y en consecuencia, una disminución en la productividad y calidad (Segeren, 2010). Esto obliga a generar tecnología de nutrición de alcatraz en México y evaluar el empleo de otras alternativas como sería el empleo de los denominados elementos benéficos.

Los elementos benéficos son aquellos que, si bien no son esenciales para la vida vegetal, pueden estimular y mejorar su crecimiento, el lantano (La) es un elemento benéfico que puede detonar efectos positivos en plantas cuando se aplican a bajas concentraciones, impulsando el crecimiento vegetal frente a factores de estrés abiótico (Pilon-Smits *et al*., 2009; Gómez-Merino *et al*., 2023). Existen pocos estudios de la aplicación de elementos benéficos en especies ornamentales.

Por lo antes expuesto, este trabajo plantea como objetivo evaluar el efecto de dos fuentes de La en el número de hojas y área foliar de tres variedades de alcatraz: Gold Fever, Regal y Garnet Glow. Las hojas constituyen el órgano aéreo más importante en la planta, el cual tiene un papel

determinante en las actividades metabólicas, junto con el área foliar tienen una relación con la cantidad de clorofila; además el número de hojas y el área foliar son indicadores importantes en el crecimiento vegetal, captación de luz, eficiencia fotosintética, respiración y transpiración (Casierra-Posada *et al.,* 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó bajo condiciones de invernadero, utilizando como material vegetal rizomas de alcatraz de las variedades Gold Fever, Regal y Garnet Glow (**Figura 1**).

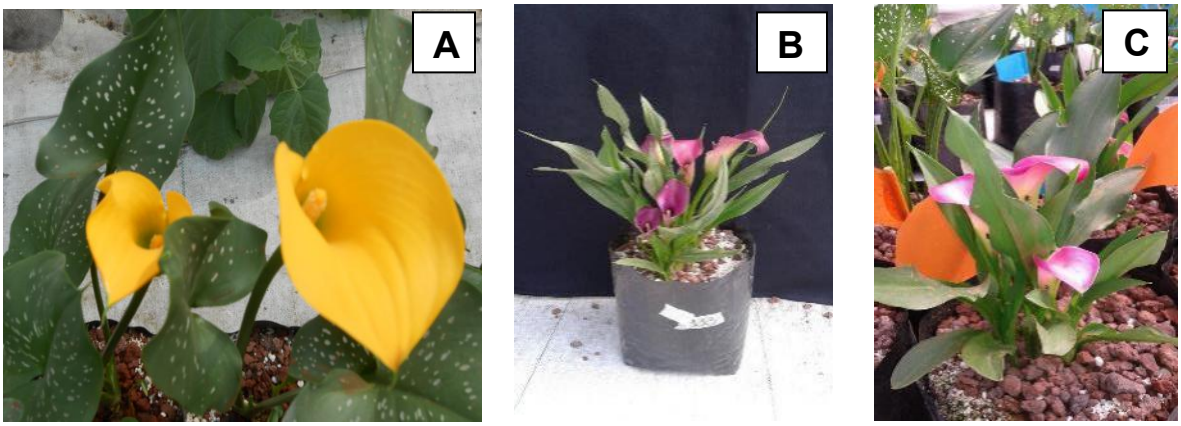


Figura 1. Plantas de alcatraz de las variedades Gold Fever (A), Regal (B) y Garnet Glow (C) tratadas con lantano.

El experimento fue un factorial 2 × 4 (fuente de La x concentración de La) en un diseño completamente al azar. Como fuentes de La se evaluaron $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ y $LaCl_3$ en las concentraciones (0, 10, 20 y 30 μM), que dieron origen a ocho tratamientos con seis repeticiones cada uno. El La fue suministrado a la solución nutritiva de Steiner al 50 %[12]. Se realizaron tres riegos semanales de 200 mL por unidad experimental, durante el ciclo de cultivo. La unidad experimental consistió en una bolsa de polietileno negro de 30 × 30 cm con una planta en una mezcla de tezontle (tamaño de partícula entre 5 y 8 mm) + Agrolita® (70/30, v/v) como sustrato.

El riego con las soluciones con La inició 15 días después de la plantación (ddp). Al momento de la cosecha se contabilizo el número de hojas y se registró el área foliar. El área foliar se midió en el integrador (LICOR, LI-3100C Área Meter, Lincoln, NE, EE. UU.) (**Figura 2**).

Figura 2. Integrador de área foliar (LI-3100C Área Meter)

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $p \leq 0.05$).

RESULTADOS

Entre fuentes evaluadas, se observó que el $LaCl_3$ incrementó el número de hojas en la variedad Gold Fever y el área foliar en las variedades Gold Fever y Garnet Glow, con respecto a la fuente $La(NO_3)_3$ $6H_2O$ (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Fuentes de lantano (La) en el número de hojas y área foliar en tres variedades de alcatraz.

Fuente de La	Número de hojas			Área foliar		
	Gold Fever	Regal	Garnet Glow	Gold Fever	Regal	Garnet Glow
$LaCl_3$	9.8 a	17.0 a	31.2 a	401.7 a	279.8 b	676.5 a
$La(NO_3)_3$ $6H_2O$	8.5 b	17.6 a	33.0 a	321.8 b	368.0 a	597.1 b

Medias con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (LSD, $p \leq 0.05$).

Los efectos de las concentraciones de La fueron significativos en las tres variedades. En Gold Fever la concentración 20 □M La incrementó el número de hojas con respeto al testigo; asimismo, en esta variedad todas las dosis de La evaluadas incrementaron significativamente el área foliar en comparación con el testigo. En las variedades Regal y Garnet Glow la concentración 30 □M La que incrementó tanto el número de hojas como el área foliar (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Concentraciones de lantano (La) en el número de hojas y área foliar en tres variedades de alcatraz.

La (μM)	Número de hojas			Área foliar		
	Gold Fever	Regal	Garnet Glow	Gold Fever	Regal	Garnet Glow
0	8.8 b	11.3 c	22.8 c	247.8 b	164.4 b	395.0 c
10	8.7 b	18.5 ab	35.7 ab	396.4 a	369.8 a	730.9 a
20	10.4 a	17.8 b	31.5 b	419.7 a	344.5 a	631.3 b
30	8.6 b	21.5 a	38.2 a	383.1 a	417.0 a	789.8 a

Medias con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (LSD, $p \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos de la interacción de los factores de estudio se presentan en la Figura 3. El número de hojas se incrementó en Gold Fever en 32 % con el tratamiento 20 □M LaCl3 con respecto al tratamiento sin La; mientras que, 30 □M La(NO3)3 6H2O aumentó en 68 y 100% esta variable en Garnet Glow y Regal, respectivamente (Figura 3A).

En lo que se refiere al área foliar, se registraron incrementos de 127 % en Gold Fever tratada con 20 □M LaCl3, de 230 % en Regal con el tratamiento 30 □M La(NO3)3 6H2O y de 125 % en Garnet Glow con 30 □M LaCl3, en todos los casos con respecto al tratamiento sin La (Figura 3B).

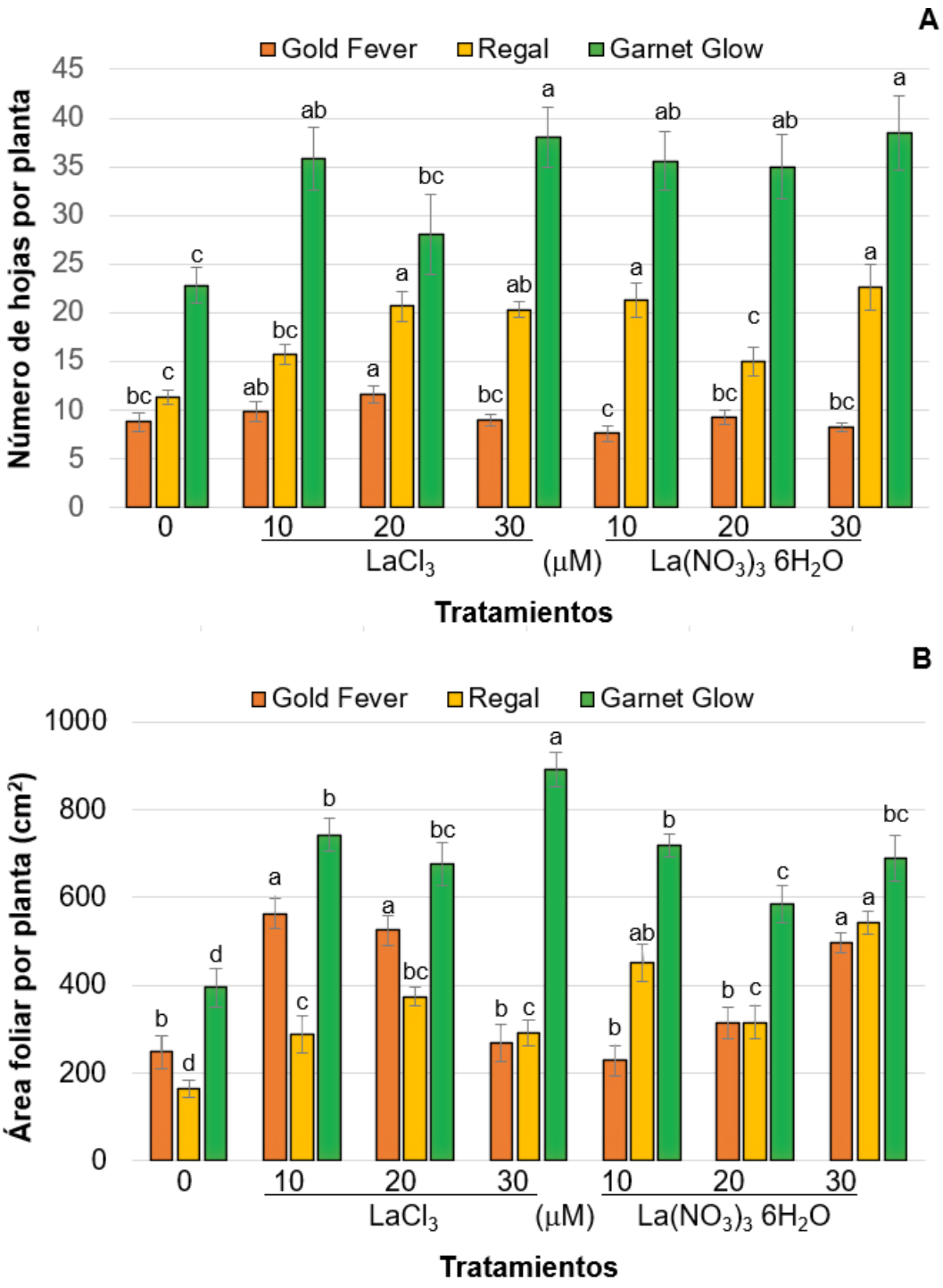


Figura 3. Número de hojas (**A**) y área foliar (**B**) por planta en tres variedades de alcatraz tratadas con dos fuentes y cuatro concentraciones de lantano (La). Barras ± DE con letras distintas en cada subfigura indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Las fuentes de La evaluadas tuvieron efectos diferenciales entre variedades. En lo que respecta a las concentraciones de La, se observó que, independientemente de las fuentes, el suministro entre

20 y 30 □M de este elemento, incrementa el número de hojas y área foliar por planta en las tres variedades de alcatraz evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Segeren, F. “Absorção de nutrientes em duas cultivares de copo-de-leite colorido (*Zantedeschia* sp.) sob fertirrigação”, Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universida de Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. San Paulo, Brasil, 2010, 74 p.
2. B. E. Corr, E. R. Widmer, “Paclobutrazol, giberellic acid, and rhizome size affect growth and flowering of *Zantedeschia*”, HortScience, Vol. 26, 2, 1991, pp. 133-135.
3. C. J. G. Cruz, L. P. A. Torres, R. J. Mendoza, “Shade, fertilizers and a natural bioregulator to improve *Zantedeschia* growth in a Mexican tropical upland area”, J. Agric. Univ. Puerto Rico, Vol. 85, 3, 2001, pp. 135-142.
4. C. J. M. Sánchez de L. “Guía de las plantas ornamentales”. Mundi-prensa. México, D. F. 2001. 685 p.
5. E. A. Pilon-Smits, C. F. Quinn, W. Tapen, M. Malagoli, M. Schiavon. “Physiological functions of beneficial elements”, Curr. Opin. Plant. Biol., Vol. 12, 3, 2009, pp. 267-274.
6. F. C. Gómez-Merino, L. F. Gómez-Trejo, R. Ruvalcaba-Ramírez, L. I. Trejo-Téllez, “Lanthanides as beneficial elements for plants”, in *Beneficial chemical elements of plants: Recent developments and future prospects,* (John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, USA, 2023), Chapter 15, pp. 349-369.
7. F. Casierra-Posada, G. R. Peña Z, J. E. Peña-Olmos, “Estimación indirecta del área foliar en *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey y *Ficus carica* L.”, Rev. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, Vol. 11, 1, 2007, pp. 95-102.
8. P. V. Bahamonde-B. Efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento sobre híbridos de calas (*Zantedeschia* spp.). Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Austral de Chile, Chile. 2006. https://hdl.handle.net/20.500.14001/33986

SOLUBILIDAD DE BIOPLÁSTICOS REFORZADOS CON HOJA DE YUCA (PALMA DEL SEMIDESIERTO)

Luz Adriana Arias-Hernandez[1], Eladio Delgadillo-Ruiz[1], Martha Cecilia Trejo-Farfán[1], María Maldonado-Santoyo[2], Lucía Delgadillo-Ruiz[3], Arturo Berumen-Cervantes[4], Andrea Abigail Hernández-Torres[4], Emmanuel Mendoza-Hernández[4],

[1]Universidad de Guanajuato, [2]Centro de Innovación Aplicada a Tecnologías Competitivas, [3]Universidad Autónoma de Zacatecas, [4]Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato.
arhadriana@ugto.mx

RESUMEN

En la mayoría de los casos, los residuos vegetales no son considerados para ser reutilizados, perdiendo con ello gran potencial de uso en la economía circular. Según sus características y propiedades de acuerdo a sus composición, pueden ser empleados desde biocombustibles, alimento o como aditivos, además de lo anterior los residuos vegetales se han aprovechado además para ser incorporados en la composición de bioplásticos como reforzantes con la finalidad de mejorar las propiedades,[1] en este sentido se ha considerado en esta investigación como residuo vegetal a la hoja de Yuca (Palma del Semidesierto), incorporándola a la mezcla de los diversos componentes en el desarrollo de bioplásticos a base de maíz y papa. La metodología consistió en un tratamiento preliminar de la muestra de hoja de Yuca realizando primeramente un proceso de molienda y tamizado, en seguida se realizaron mezclas con los respectivos almidones con diferentes proporciones del residuo (0, 1, 3, 5 y 7%) obteniendo, de acuerdo a estas proporciones, 5 bioplásticos con almidón de maíz (M1, M2, M3, M4 Y M5) y 5 bioplásticos con almidón de papa (P1, P2, P3, P4, P5) integrando a las mezclas glicerina como plastificante además de otros aditivos (Ácido acético, Anhídrido maleico). Posteriormente se realizaron análisis de porcentaje de humedad, absorción y solubilidad en agua de las muestras de bioplásticos tanto de papa como de maíz. Se realizaron diseños experimentales dirigidos de un solo factor. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de confianza del 95 %. En lo que respecta al porcentaje de humedad, se observaron valores promedio entre 2.8 a 3.2 %, para los bioplásticos de maíz y valores entre 4.6 y 5.7 %, para el caso de los de papa. Respecto a los resultados de absorción de los bioplásticos en agua, de manera comparativa se observan valores promedio similares tanto para los bioplásticos a base de maíz como los de papa con valores de 56.0 y 55.2 % respectivamente. Por otro lado, se observa valores promedio de solubilidad en agua ligeramente menor para los bioplásticos a base de papa (23.7- 27.6%) en comparación con los valores obtenidos a base de maíz (28.6-31.5%) en donde se observa disminución de los valores conforme se incrementa el contenido de la hoja de Yuca para ambos casos de los bioplásticos. De los resultados anteriores se puede concluir que el comportamiento observado de los bioplásticos obtenidos en cuanto a las interacciones entre los componentes y la incorporación de hoja de Yuca, fueron buenas y nos permite determinar su potencial de uso, ya que una mayor solubilidad puede favorecer a una mejor degradación de los materiales y ser propuestos de acuerdo a las propiedades adquiridas para diversos usos con menor impacto al ambiente.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos sintéticos elaborados a partir de derivados de petróleo, los cuales son altamente demandados al cubrir necesidades tanto a nivel industrial como doméstico en una gran variedad de formas, características y usos (Tasseron et al., 2024; Fernández et al., 2018) tienen como consecuencia la generación de residuos en cantidades demandantes y que en la mayoría de los casos no son tratados. Lo anterior ha derivado impactos negativos afectando severamente el medio ambiente (Villada, 2007), aunado a lo anterior se suma el hecho de que dichos residuos plásticos presentan baja degradabilidad (Alarcón, 2016), generando la presencia de microplásticos (Chen, 2024). Por lo anterior es que el uso de materiales de origen natural como los bioplásticos sea considerado como una alternativa con gran relevancia (Álvarez, 2017). Recientemente se ha

enfocado investigaciones interesantes en las que la diversidad de los componentes es amplia, así como en los aditivos, entre ellos se puede resaltar la integración de fibras como el bagazo de maguey como reforzante (Arias et al., 2025). En esta investigación en particular se ha enfocado en la hoja de palma de yuca caracterizada por desarrollarse en zonas semiáridas constituyendo en algunas comunidades una parte importante por su aprovechamiento en flor y fruto (Nava et al., 2023). El desarrollo de los bioplásticos se llevó a cabo empleando almidón de papa y maíz adicionando glicerina como plastificante, así como el residuo de palma de yuca para determinar su efecto en la solubilidad de dichos bioplásticos.

TEORÍA

El bioplástico ha sido definido como material fabricado a base de polímeros naturales derivados de productos en los que se ha encontrado predominantemente los de origen vegetal tales como papa, maíz, trigo, soja, etc., aunque también es frecuente encontrar definiciones en las que se define como un material de origen biológico y/o biodegradable. Los biopolímeros ya sea de origen natural, de síntesis química o de microorganismos, pueden ser procesados por medio de las mismas tecnologías que los materiales termoplásticos convencionales, con procesos en los que se incluye la extrusión, inyección o soplado (Alucho et al., 2021) considerándose en elementos obtenidos de fuentes renovables de gran potencial. Por otro lado, los biopolímeros se pueden clasificar según su fuente (Maldonado et al. 2021), dividiéndose en tres subgrupos: polímeros basados en recursos renovables que incluyen almidón y celulosa, constituidos por polímeros biodegradables basados en monómeros (aceites vegetales y ácido láctico) y biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos (PHA)) (Valero et al., 2013. De esta forma es que se puede mencionar que al hacer referencia a las propiedades físicas y mecánicas únicas de estos biopolímeros existe una amplia gama de aplicaciones en las que se incluye desde la industria alimentaria hasta aplicaciones médicas, con su combinación de funcionalidad y sostenibilidad. A través de esta investigación, se comprende la importancia y el potencial de los polímeros en nuestro mundo moderno, destacando la innovación continua en el campo de los biopolímeros y su papel crucial en la búsqueda de soluciones más sostenibles y con una mayor contribución en la economía circular.
Las diversas investigaciones en el desarrollo de los bioplásticos comprenden tanto la variación de los componentes como fibras residuos en las que se ha contemplado las de bagazos de caña, azúcar por mencionar algunas. Se ha determinado que la incorporación de estos aditivos tiene efectos sobre las propiedades de los bioplásticos desarrollados.

PARTE EXPERIMENTAL

A continuación, se mencionan los elementos empleados: almidón de maíz, almidón de papa, ácido acético (Karal) y glicerina grado reactivo, Anhídrido maleico (Karal), hoja de palma de Yuca. Este último tuvo un tratamiento previo que consistió en molerlo hasta disminuir tamaño de partícula, finalmente se tamizó hasta un tamaño de partícula menor a 200 mm.

Elaboración de los plásticos

Se llevaron a cabo diversas mezclas generando estos biopolímeros a nivel experimental, los cuales consistieron en la variación de proporciones de los elementos mencionados anteriormente, siendo los mismos elementos tanto para la elaboración de bioplásticos de maíz como de papa. Al ser obtenidas las mezclas de los respetivos bioplásticos se analizaron porcentajes de humedad y de solubilidad de agua a 24 horas. Una vez obtenidas las mezclas se empleó un equipo de extrusión por soplado de doble husillo bajo condiciones controladas de temperatura (rango 90-100-90).

Determinación del porcentaje de humedad

Para el porcentaje de humedad se pesaron 2 g de cada una de las muestras de plástico (4 repeticiones), posteriormente se secaron durante 24 horas a 50 °C. Finalmente se pesaron las muestras y se realizaron los cálculos correspondientes.

Determinación del porcentaje de solubilidad
Para la determinación del porcentaje (%) de absorción de agua a las muestras anteriores se agregó 20 mL de agua destilada y se mantuvieron a temperatura ambiente durante 48 horas, posterior a ese tiempo se desechó el agua de las muestras y se pesaron, posteriormente se secaron a 50°C durante 24 horas, para determinar mediante cálculos correspondientes la solubilidad de los biopolímeros.

Determinación de Absorción de agua
El procedimiento en la determinación del porcentaje de absorción de agua consistió en pesar 2 gramos de los biopolímeros a los cuales se agregó 20 mL de agua destilada, después se sacaron de la solución retirando el exceso de agua para ser pesados a las 24 horas de contacto en agua, para determinar mediante cálculos correspondientes la absorción de agua de las muestras de biopolímeros.

Diseño experimental y estadístico
Se realizó un diseño completamente aleatorizado de un factor para evaluar el efecto de cinco mezclas para la obtención de los biopolímeros y por cuadriplicado. Los datos de los porcentajes de humedad y absorción de agua cumplieron los supuestos de la estadística paramétrica.

RESULTADOS

Se obtuvo un total de 5 bioplásticos de los cuales se integró la misma proporción de elementos mencionados en la metodología, variando las cantidades de residuos de hoja de palma de yuca (RPY) como se muestra (tabla 1). Cada uno de los bioplásticos a base de maíz (m) están descritos en la tabla con sus respectivos componentes, así M1 equivale a la mezcla que no contiene RPY. En el caso de los bioplástico M2, M3, M4, M5, los componentes son los mismos en todas las muestras, pero se fue variando el RPY en cantidades de 10, 30, 50 y 70 g, respectivamente. Del mismo modo se presentan los resultados de los bioplásticos desarrollados con papa, mostrando la composición de los bioplásticos desarrollados con sus componentes. Para este caso Ap1 hace referencia a la mezcla que no contiene RPY, teniendo los bioplásticos P2, P3, P4 y P5 los mismos componentes, variando como en el caso anterior el RPY en cantidades de 10, 30, 50 y 70 g, respectivamente.

Bioplástico	AM	G	AA	AM	RPY
M1	650	300	50	20	0
M2	650	300	50	20	10
M3	650	300	50	20	30
M4	650	300	50	20	50
M5	650	300	50	20	70
Bioplástico	AP	G	AA	AM	RPY
P1	650	300	50	20	0
P2	650	300	50	20	10
P3	650	300	50	20	30
P4	650	300	50	20	50
P5	650	300	50	20	70

Tabla 1. Proporciones de componentes para la obtención de bioplásticos a base de maíz y papa.

Porcentaje de humedad de los bioplásticos
De los resultados obtenidos al realizar el análisis de varianza, este indica diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre los promedios de las proporciones de los bioplásticos tanto de maíz

como de papa con respecto a la variables analizadas con nivel de confianza del 95%. Así mismo el contraste múltiple de medias LSD indica con letras desiguales diferencias significativas entre las proporciones de los bioplásticos obtenidos.

Al analizar los resultados de los bioplásticos a base de maíz (figura 1a) se observa que los valores promedio más altos de humedad lo presenta el bioplástico M2 (3.20%) cuya característica en composición contiene 10 g de RPY, seguido de la muestra M1 que es la muestra que no contiene RPY. Por otro lado, los valores de los bioplásticos M4 y M5 presentan valores más bajos de humedad respecto a los mencionados anteriormente (2.82 y 2.88 % respectivamente).

Respecto a los resultados del bioplástico a base de papa se observa en este caso el mayor valor promedio para el bioplástico P2 (5.67%) con contenido de RPY de 10 g, seguido de los valores de los bioplásticos M4 y M5 (5.55 y 5.30 % respectivamente), presentando el valor más bajo promedio el bioplástico P3 (4.7 %). De forma comparativa se observa que los bioplásticos de papa presentan mayor porcentaje de humedad respecto a los de papa. Lo anterior puede atribuirse debido a la composición base del almidón de maíz y papa que le confieren caracteres hidrofílicos debido a la presencia de grupos hidroxilo (Chen et al., 2024). Estos resultados de humedad son menores a los reportados por Sirivechphongkul et al. quien desarrolló películas de bioplástico con cierto porcentaje de polivililo combinada con lignina extraída de frutas, reportando un valor de 5.9 sin lignina incrementándose hasta 13.38% de humedad para una mayor cantidad de lignina incorporada.

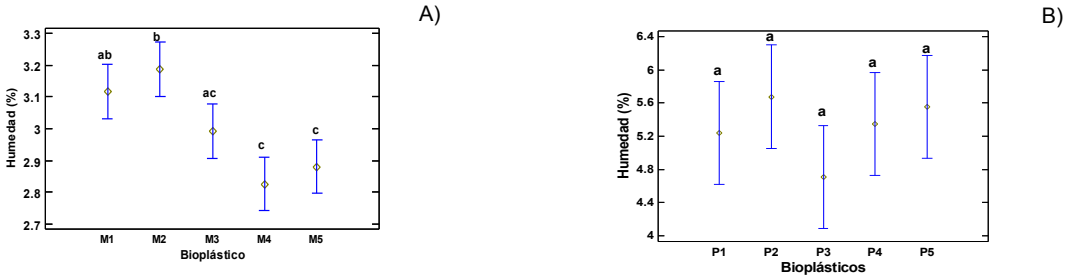


Figura. 1. Porcentajes de humedad (%) de bioplásticos A) base almidón de maíz y B) base almidón de papa.

Solubilidad de bioplásticos

En la figura 2 se muestran los resultados de porcentaje de solubilidad de los bioplásticos. Se observa que para el caso de los bioplásticos de maíz (figura 2A), el mayor valor promedio de absorción corresponde al bioplástico M2 con 31.57% de solubilidad de agua y siendo el más bajo para el bioplástico M5 con 29.78 % de solubilidad.

Del mismo modo para los bioplásticos de papa (figura 2B), se observa P3 presenta el mayor valor promedio de solubilidad siendo en este caso el menor valor de solubilidad para el bioplástico P5 (23.57 %).

De forma comparativa en este caso se observa que los bioplásticos a base de maíz presentan mayor solubilidad respecto a los bioplásticos de papa.

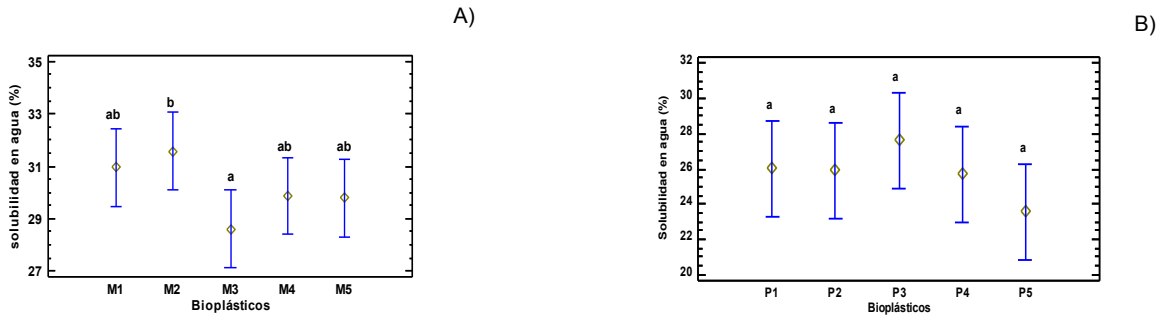


Figura 2. Porcentajes de solubilidad de bioplástico (%). A) base de almidón de maíz y B) base almidón de papa

Absorción de agua de los biopolímeros

Los resultados de absorción de agua a las 24 horas de contacto se muestran en la Figura 3, observando que los plásticos a base de maíz presentan valores promedio más alto respecto a los de papa. Los valores absorción de agua como se observa en la Figura 3A, oscilan en un rango de siendo es 55.2 % el mayor valor registrado correspondiente al bioplástico M2, hasta un menor valor de absorción de 50.97 % correspondiente al bioplástico M4. En el caso de los bioplásticos de papa su mayor valor registrado es para el bioplástico P2 con un valor de 56.10 % de absorción y el menor valor corresponde en este caso para el bioplástico P3 con 52.60%.

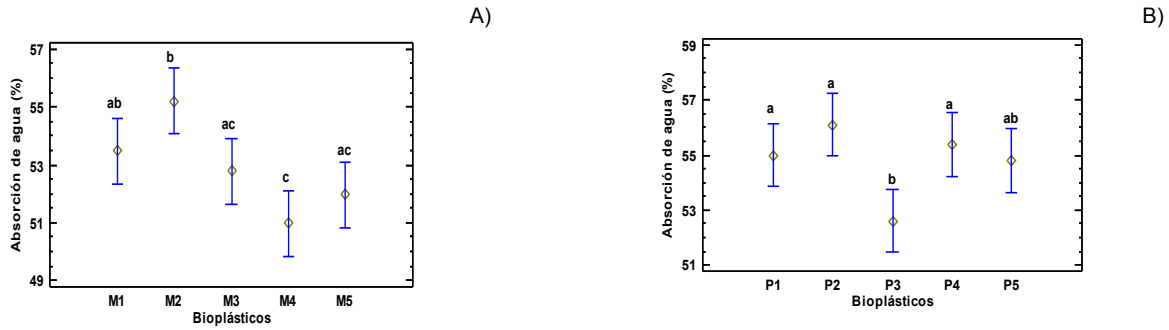


Figura 3. Porcentajes de absorción de agua (%) de bioplásticos. A) base de almidón maíz y B) base de almidón de papa

Las diferencias que se presentan entre los bioplásticos de papa y de maíz aún teniendo la misma composición de los materiales empleados (glicerina, ácido acético y anhídrido maleico), puede estar atribuido a la diferencia en proporción de amilosa y amilopectina que contiene el almidón de papa y de maíz (Jayalath et al., 2022). Además de ello influye el plastificante que para este caso fue la glicerina, así como el proceso de extrusión mediante el cual se desarrollaron los bioplásticos como es mencionado por algunos autores. Aunado a lo anterior el grado de solubilidad puede estar relacionado con las interacciones en la que interviene el residuo de palma de yuca para definir el comportamiento en su contacto con el agua (Van de Velde et al. 2002). Esta investigación, así como las relacionadas con los bioplásticos nos permiten comprender el potencial de aplicaciones de los bioplásticos tales como envolturas para alimento, cubiertos o como acolchados en agricultura (Arias-Hernández et al., 2021; Delgadillo-Ruiz et al.; 2022) como lo indican las investigaciones reportadas.

CONCLUSIONES

Se definieron las condiciones y proporciones de los elementos para llevar a cabo el desarrollo de los bioplásticos a base de papa y maíz, incorporando la hoja de palma de yuca. La determinación del porcentaje de humedad de los bioplásticos nos permitirá determinar los efectos en sus propiedades físicas, como durabilidad y capacidad de descomposición. En general se puede determinar que la incorporación de los residuos genera un efecto de cambio en la estabilidad física de los bioplásticos frente a la solubilidad en agua.

REFERENCIAS

1. Alarcón-Cavero, H. A., Arroyo-Benites, E. (2016). Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de papa. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 82(3). 315 – 323.
2. Alucho-Pasto, J., Ramos-Naranjo, S., Saltos-Segura, D. Tecnologías para el desarrollo de biopolímeros, como una alternativa en la sustitución del plástico. *Alimentos, Ciencia e Ingeniería* 2021. 28, 95 – 100.
3. Álvarez, K., Famá, L., Gutiérrez, T.J. (2017). Physicochemical, Antimicrobial and Mechanical Properties of Thermoplastic Materials Base on Biopolymers with Application in the Food Industry. *Advances in Phisicochemical Properties of Biopolymers*. 358 – 400.
4. Arias Hernández, L.A.; Maldonado Santoyo, M.; Delgadillo Ruiz, L.; Solís Silván, R.; Calderón Vega, F.; Aguilera, G.C.; Reducindo Ruiz, S.M.; González Trinidad, J.; Berumen Cervantes, A.; Hernández, A.A.O. (2025) The Effect of the Addition of Maguey Bagasse in the Production of Bioplastics Based on Corn and Potato Starch. *J. Compos. Sci*. 9, 213.
5. Arias-Hernández, L. A.; Juaristi-Videgaray, E.; Mares-Martínez, H. E.; Solís-Silván, R.; Maldonado-Santoyo, M.; Calderón-Vega, F.; Valdés-Vázquez, J. F.; Delgadillo-Ruiz, E. Valoración de acolchados ecoplásticos utilizados para reducer la evaporación en suelos agrícolas. *Ciencia Nicolaita* 2024, 91, 1 – 9. https://doi.org/10.35830/cn.vi91
6. Chen, K., Tian, R., Jiang, J., Xiao, M., Wu, K., Kuang, Y., Deng, P. Zhao, X., Jiang, F. (2024). Moisture loss inhibition with biopolymer films for preservation of fruits and vegetables: *A review. International Journal of Bilological Macromolecules*. 263.
7. Chen, C., Pagsuyoin, S. A., Van Emmerik, T. H. M., Xu, Y., He fen Guo, Y., Liu, D. Xu, Y. (2024). Significant regional disparities in reverine microplastic. *Journal of Hazardous Materials*. 472. 2 – 9.
8. Delgado-Villaseñor, A. K.; Maldonado-Santoyo, M. (2021) Circularidad para los plásticos: Reciclado post-uso vs fabricación de plásticos biodegradables. *Revista Electrónica de Divulgación de la Investigación* 21, 60 – 71.
9. Delgadillo-Ruiz, E.; Vázquez Rodríguez, G.; Tirado Torres, D.; Robles Buenrostro, M. F.; Pérez Gallegos, D. O.; Hernández Moreno, J. D.; Arias Hernández, L. A. (2022) Efecto de la implementación de acolchados en los componentes del balance hídrico superficial. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–9. Recuperado a partir de https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3837
10. Delgadillo-Ruiz, E.; Castorena-Padilla, C.; Peña-Vázquez, F.; Exiga-Soria, A. R.; Ramírez-Siorda, G. Y., Arias-Hernández, L. A.; Delgadillo-Ruiz, L. (2022) Clasificación de acolchados y su implementación en la retención de humedad del suelo. *Jóvenes en la Ciencia*. 6, 1–9. Recuperado a partir de https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3838
11. Fernández, N. F. (2018). Plásticos biodegradables. Una vía para disminuir la contaminación ambiental. *Revista de la Sociedad Cubana de México*. 4(3). 7 – 14.
12. Jayalath, U. V., Samaraweera , N.R., Ganachari, S. V., Soudagar, M. E. M., Sajjan, A. M., Kamat, S. Mujtaba, M.A., Shettar, A. S., Anqi, A. E., Reza-Safaei, M., Elfasakhany, A., Haque-Siddiqui, M. I., Asharaf-Ali, M. (2022). Bio-based material from fruit waste of Orange peel for industrial applications. *Journal of Materials Research and Tecnology*. 17. 3186 – 3197.

13. Nava-Martínez, L. H. (2023) Recolección de alimentos vegetales: una tradición chichimeca en Zacatecas. *Revista de Ciencias Antropológicas*. 87, 43 – 68.
14. Sirivechphongkul, K.; Chiarasumran, N.; Saisriyoot, M.; Thanapimmetha, A.; Srinophakun, P.; Iamsaard, K.; Lin, Y.-T. (2022). Agri-Biodegradable Mulch Films Derived from Lignin in Empty Fruit Bunches. *Catalysts*. 12(1150). 1 – 19.
15. Tasseron, P. F., Van Emmerikk, T. H. M., Vriend, P. Hauk, R., Alberti, F., Mellink, Y., Ploeg, M. (2024). Defining plastic pollution hotspots. Science of the total Environment. 934.
16. Villada, H. S., Velasco R. J. (2007). Biopolymers naturals used in biodegradable packaging. *Revista bibliográfica. Temas Agrarios*. 12(2). 5 – 13.
17. Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón Y., Uscategui, Y. (2013). Biopolymers: progress and prospect. *Dyna*. 80(181). 171 – 180.
18. Van de Velde, K., Kiekens, P. (2002). Byopolymer: overview of several properties and consequences on their applicatións. *Polymer Testing*. 21. 433 – 442.

EVALUACIÓN DE LA BIOSORCIÓN DE FLUORURO DE SODIO Y NITRATO DE PLATA EN CEPAS BACTERIANAS MEDIANTE ABSORCIÓN ATÓMICA

Darina Itzel Medina Torres, Elizabeth Ortiz Cabrera, Veronica Esparza Cordero y Karol Karla García Aguirre

Instituto Politécnico Nacional-UPIIZ
dmedinat1800@alumno.ipn.mx

RESUMEN

La contaminación por fluoruro y metales como la plata representa un riesgo ambiental significativo, especialmente en ecosistemas acuáticos, la plata proviene principalmente de actividades industriales, como la minería. Cuando el agua atraviesa los suelos, disuelve diversos compuestos, entre ellos los de flúor, lo que resulta en concentraciones elevadas de fluoruro en los acuíferos (Ortega-g¡Guerrero, 2009) Algunos microorganismos han desarrollado sistemas genéticos que les permiten tolerar concentraciones elevadas de estos metales, lo que los convierte en una alternativa viable para la biorremediación de ambientes contaminados (Flores, 2016).

En este contexto, la biosorción ha demostrado ser una estrategia eficiente y rentable frente a otras técnicas de remoción de metales, ya que los microorganismos pueden actuar como agentes de captura de contaminantes mediante diversos mecanismos, como la microprecipitación, complejación, adsorción física e intercambio iónico, dependiendo de la especie metálica y la composición de la pared celular del biosorbente (Flores, 2016).

Este estudio evalúa la capacidad de tolerancia y biosorción de fluoruro de sodio y nitrato de plata en cinco cepas bacterianas aisladas de jales mineros. Las cepas fueron expuestas a concentraciones de 13, 20 y 25 mM de fluoruro de sodio, y a 300, 500 y 750 ppm de nitrato de plata. Mediante la técnica de siembra por goteo y el conteo de unidades formadoras de colonia (UFC), se calcularon las concentraciones inhibitorias medias (CI_{50}) para cada cepa, identificando aquellas con mayor resistencia. Las cepas más tolerantes fueron *Stutzerimonas stutzeri* y *Kocuria rhizophila*, con CI_{50} de 23.75 mM y 20.63 mM para fluoruro de sodio, y 332.68 ppm y 424 ppm para nitrato de plata, respectivamente. Posteriormente, a partir de los matraces de exposición, se separaron el sobrenadante y la biomasa por centrifugación para su análisis mediante espectrometría de absorción atómica. Esta técnica permitió cuantificar tanto los niveles residuales de los contaminantes en el sobrenadante como los acumulados o adsorbidos en la biomasa celular.

La cuantificación mediante absorción atómica del sobrenadante y de la biomasa evidenció la capacidad diferencial de remoción de fluoruro y plata por parte de las cepas microbianas analizadas. Se observó una disminución significativa en la concentración de los contaminantes en el sobrenadante, lo cual indica una eficiente interacción entre las cepas y los metales evaluados. Asimismo, la detección de fluoruro y plata en la biomasa sugiere mecanismos activos de bioacumulación o biosorción ya que para el flúor hubo una remoción promedio del 62% y para la plata la remoción llegó a ser del 80%. Estas observaciones respaldan el potencial de las cepas como agentes biorremediadores, especialmente en ambientes contaminados con altas concentraciones de fluoruro y plata, contribuyendo así a un tratamiento biológico más sustentable y eficiente.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua por metales pesados y halogenuros representa una amenaza creciente para los ecosistemas acuáticos, particularmente en regiones donde la actividad minera es intensa. En este contexto, dos contaminantes de especial preocupación son el fluoruro y la plata. El primero, aunque esencial en concentraciones mínimas para la salud dental, puede alcanzar niveles tóxicos en el agua subterránea, principalmente en regiones con alta presencia de fluorita o en zonas áridas donde los pozos profundos atraviesan formaciones geológicas ricas en este elemento. La exposición

prolongada a concentraciones superiores a 1.5 mg/L puede provocar fluorosis dental y esquelética, condición que afecta a millones de personas en todo el mundo, incluyendo a cerca del 6% de la población mexicana, especialmente en estados como Zacatecas, Coahuila y San Luis Potosí (Olguín Gutiérrez, 2010).

Por otro lado, la plata, tradicionalmente valorada por sus propiedades antimicrobianas, se ha convertido en un contaminante prioritario en cuerpos de agua receptores de efluentes industriales, mineros y hospitalarios. A pesar de su baja toxicidad para humanos en concentraciones moderadas, su impacto en comunidades microbianas y organismos acuáticos es significativo, afectando procesos enzimáticos esenciales y disminuyendo la biodiversidad (Sánchez-Cadena et al., 2023).

Frente a estas problemáticas, la remoción de dichos compuestos mediante tecnologías convencionales como la osmosis inversa o la electrodiálisis puede resultar económicamente inviable, especialmente en zonas rurales. En este contexto, la **biosorción** emerge como una alternativa sustentable y de bajo costo. Este proceso se basa en la capacidad natural de ciertos microorganismos para fijar metales en su superficie celular a través de mecanismos como la adsorción, complejación, microprecipitación e intercambio iónico, sin requerir modificaciones genéticas o pretratamientos químicos costosos (Olguín Gutiérrez, 2010).

Diversos estudios han demostrado que microorganismos aislados de ambientes extremos o contaminados, como los jales mineros, han desarrollado tolerancia a altas concentraciones de metales y metaloides. Este fenómeno adaptativo los convierte en candidatos ideales para aplicaciones de biorremediación, ya que no solo sobreviven en medios hostiles, sino que también pueden transformar o inmovilizar los contaminantes (Sánchez-Cadena et al., 2023).

Así, el presente estudio se enfoca en evaluar la capacidad de cepas bacterianas aisladas de residuos mineros para remover eficientemente fluoruro y plata del medio acuoso. Esta investigación no solo busca ofrecer una alternativa biotecnológica al tratamiento convencional de aguas contaminadas, sino también fortalecer las estrategias de remediación sustentable en comunidades vulnerables a la contaminación industrial.

METODOLOGÌA

Para evaluar la capacidad de tolerancia y biosorción de metales en cepas bacterianas aisladas de residuos mineros, se diseñó un experimento dividido en dos etapas principales: 1) determinación de la tolerancia microbiana a fluoruro de sodio (NaF) y nitrato de plata ($AgNO_3$), y 2) cuantificación de la biosorción de dichos contaminantes mediante espectroscopía de absorción atómica.

Aislamiento de cepas microbianas

Las bacterias empleadas en este estudio fueron previamente aisladas de muestras obtenidas en jales mineros y aisladas en caldo de triptona soja (TSA) y agar TSA.

Pruebas de tolerancia y determinación de CI_{50}

Las cinco cepas bacterianas seleccionadas fueron cultivadas caldo Luria con concentraciones crecientes de fluoruro de sodio (13, 20 y 25 mM) y de nitrato de plata (300, 500 y 750 ppm). La inoculación se realizó mediante técnica de siembra por goteo en cajas Petri con agar TSA.

Después de 24 horas de incubación a 30°C, se realizó el conteo de unidades formadoras de colonia (UFC) para cada tratamiento. Con estos datos se calculó la concentración inhibitoria media (CI_{50}) para cada cepa, utilizando curvas dosis-respuesta. Esta métrica permitió identificar las cepas con mayor resistencia a cada tipo de contaminante. Las más destacadas fueron *Stutzerimonas stutzeri* y *Kocuria rhizophila*, con CI_{50} de 23.75 mM y 20.63 mM para fluoruro de sodio, respectivamente, y de 332.68 ppm y 424 ppm para nitrato de plata.

Etapa de exposición y separación de biomasa

Las cepas más tolerantes fueron seleccionadas para los ensayos de biosorción. Se cultivaron en caldo Luria líquido suplementado con las concentraciones mencionadas de fluoruro de sodio y nitrato de plata. Tras un periodo de exposición de 24 horas, los cultivos fueron centrifugados a 6,000 rpm durante 15 minutos en tubos cónicos de 15 mL, para separar la biomasa microbiana del sobrenadante, obteniendo así dos fracciones: el líquido sobrenadante (contaminante no removido) y la biomasa celular con los contaminantes potencialmente adsorbidos o acumulados.

Análisis por espectroscopía de absorción atómica (AAS)
Los sobrenadantes con plata fueron analizados mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS, Thermo Scientific ICE 3000, flama aire-acetileno) y la concentración de fluoruro mediante electrodo de ion selectivo. La diferencia entre la concentración inicial y la concentración en el sobrenadante permitió calcular el porcentaje de remoción. Asimismo, se estimó la eficiencia de acumulación intracelular y/o adsorción superficial al comparar los niveles detectados en la biomasa.

RESULTADOS

Se evaluó la tolerancia de cinco cepas bacterianas aisladas de jales mineros frente a concentraciones crecientes de fluoruro de sodio (NaF) y nitrato de plata ($AgNO_3$). Las cepas fueron expuestas a concentraciones de 13, 20 y 25 mM de NaF, así como a 300, 500 y 750 ppm de $AgNO_3$, mediante la técnica de siembra por goteo y conteo de unidades formadoras de colonia (UFC). A partir de estos datos se determinaron las concentraciones inhibitorias medias (CI_{50}) mediante regresión sigmoidal.

Las cepas *Stutzerimonas stutzeri* (1.3) y *Kocuria rhizophila* (3) mostraron los valores más altos de CI_{50}, con 23.75 mM y 20.63 mM para fluoruro, respectivamente, y 332.68 ppm y 424 ppm para plata, lo que indica una notable resistencia a ambos contaminantes. Estas cepas fueron seleccionadas para su evaluación en ensayos de biosorción.

Los ensayos de biosorción realizados con las cepas 1.3 y 3 seleccionadas por su alta tolerancia a fluoruro de sodio y nitrato de plata, revelaron diferencias significativas en su capacidad de remoción para ambos contaminantes.

Remoción de Nitrato de Plata ($AgNO_3$):
La cepa 1.3 mostró una tendencia ascendente en la eficiencia de remoción conforme aumentó la concentración inicial de plata. A 300 ppm, la remoción fue del 76.4%, incrementándose a 82.3% a 500 ppm y alcanzando un máximo de 89.6% a 750 ppm. Esta tendencia sugiere una posible inducción de mecanismos de biosorción o bioacumulación en respuesta al estrés metálico, además de una alta afinidad de la pared celular por los iones Ag^+.

La cepa 3, en cambio, alcanzó su mayor eficiencia a 500 ppm con un 85.8%, pero mostró una ligera disminución a 750 ppm (76.4%), lo cual puede deberse a un efecto de saturación de sitios activos o inicio de toxicidad celular a concentraciones elevadas. A 300 ppm, la remoción fue de 79.3%, lo que indica un buen desempeño incluso a concentraciones bajas.

Ambas cepas presentaron valores superiores al 75% en todas las concentraciones evaluadas, lo cual las posiciona como biosorbentes eficientes para metales pesados como la plata.

Remoción de Fluoruro de Sodio (NaF):
En cuanto a la remoción de fluoruro, los porcentajes fueron consistentemente menores en comparación con los de plata, lo cual es atribuible tanto a la naturaleza aniónica del fluoruro (F^-) como a su menor afinidad por los grupos funcionales típicos de la superficie bacteriana. No obstante, ambas cepas mostraron capacidades de retención notables.

La cepa 1.3 mostró una eficiencia de remoción de 59.7% a 13 mM, que aumentó levemente a 62.3% a 20 mM y se estabilizó en 60.3% a 25 mM. Esta consistencia sugiere una capacidad sorbente estable, posiblemente dominada por interacciones electrostáticas o intercambio iónico superficial.
Por su parte, la cepa 3 alcanzó un máximo de 64.4% a 13 mM, disminuyendo a 60.6% a 20 mM y manteniéndose en 59.5% a 25 mM. Este comportamiento indica un desempeño ligeramente más eficiente en condiciones de menor carga iónica, probablemente debido a una mayor disponibilidad de sitios activos no saturados.

CONCLUSIONES

Las cepas *Stutzerimonas stutzeri* (1.3) y *Kocuria rhizophila* (3) presentaron eficiencias de remoción superiores al 75% para plata, alcanzando 89.6% y 85.8%, respectivamente. En cuanto al fluoruro, los porcentajes de remoción variaron entre 59.5% y 64.4%. La cepa 1.3 mantuvo valores consistentes en todas las concentraciones, mientras que la cepa 3 mostró ligera disminución con el aumento de fluoruro. Estos resultados demuestran que ambas cepas poseen alta capacidad biosorbente, destacando su eficacia en la retención de plata y su desempeño estable frente a fluoruro, lo que respalda su utilidad en procesos de biorremediación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Flores, B. J. (2016). BIOSORCIÓN DE PLOMO POR BIOMASA INACTIVA DE BACTERIAS. Guerra, B. E., Sandoval Meza, A. X., Manrique González, L. S., & Barrera Rangel , S. P. (2024).
2. Olguín Gutiérrez, M. T. (2010). Intercambiadores iónicos y adsorbentes de interés en procesos nucleares y ambientales. *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*, pp. 271-280.
3. Ortega–Guerrero M.A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma–Chapala, México. Rev. Mex. Cienc. Geol. 26, 143–
4. Sánchez-Cadena, L. E., Banda Mendoza, S. D., Cuevas Miranda, D. A., Dávalos Guzmán, R. M., & Gamiño Arroyo, Z. (2023). Método sustentable de recuperación de plata de efluentes mineros por adsorción con hidrogeles. *Verano de la Ciencia XXIX*, Universidad de Guanajuato.

¿CALENTAMIENTO GLOBAL, SEQUÍA?: NOPALES CADA DÍA

Juan Manuel Quezadas Fuentes[1], Alfredo Trejo Córdova[1], Roberto Vázquez Avendaño[1], Bárbara Vargas Miranda[2]. Demetrio Ambriz García[1].

[1]Departamento de Biología de la Reproducción. [2]Departamento de Ciencias de la Salud. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco Núm. 186. Col. Leyes de Reforma 1ª Sección,Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09310. Ciudad de México, México.
quezadas_mbra@xanum.uam.mx

RESUMEN

El calentamiento global y la consecuente sequia presentan retos importantes para la producción de alimentos, especialmente en el sector agrícola. Además de ello en las ciudades, el efecto invernadero es aún mayor. Por ello, el cultivo de cactáceas comestibles (nopales) son una alternativa para aumentar la densidad de las azoteas verdes con bajo consumo de agua, disminuir el calentamiento y generar alimentos. El presente trabajo fue desarrollado para conocer la producción de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en maceta en azotea en una casa de la alcaldía Iztapalapa en la Ciudad de México. Las pencas o cladiodos fueron colocadas en 48 macetas de 16 cm de diámetro y 16 cm de altura, con sustrato de 2/3 de tierra y 1/3 de composta, en una superficie de $2m^2$. Durante el año 2024, se midió el crecimiento de los brotes (ancho y largo) con un vernier, hasta que alcanzaron el tamaño de corte, así como el número de cladiodos obtenidos para consumo por mes. El 33% de los brotes permaneció en estado latente, mientras que el 67% alcanzó el tamaño para consumo en 35 días. El tamaño inicial del cladiodo fue de 3.9±1.4 x 6.6±3.2cm (largo x ancho, superficie $22.9cm^2$) y en corte de 8.7±0.6 x 16.9±2.8cm (superficie de $116.1cm^2$), lo que representa un aumento de superficie de 811%. La mayor producción ocurrió en meses de alta insolación (>19°C, abril a septiembre) con 49 cladiodos por mes contra 25 en meses con temperaturas menores. Se concluye que esta es una alternativa para la producción de alimentos en las condiciones actuales de crisis hídrica y calentamiento global.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global representa un gran reto, incluso en las ciudades, dada la ambientación, reducida vegetación y actividades vehiculares, así como acumulación de gases hace que sea más intenso el efecto, de ahí la urgencia de tener más áreas verdes, por ejemplo en las azoteas, pero que además se produzcan alimento para contender la crisis hídrica (Montes de Oca, F, 2014). De los muchos problemas ambientales actuales, entre los que podemos destacar la crisis hídrica, contaminación del agua, del aire, de la tierra, partículas suspendidas, gases de efecto invernadero, tóxicos ambientales y muchos más, es el calentamiento global del que mas se escucha, puesto que sus consecuencias han sido estudiadas y porque no decirlo, han sido ya experimentadas.

El mínimo aumento de 1°C en la temperatura media anual promedio, puede ser de serias consideraciones. Además, sabemos que el cambio climático (donde el calentamiento global tiene acción directa) afecta muchas funciones sustantivas de la vida en el planeta. De ahí por ejemplo la variación de la época de lluvias, temperaturas medias cada vez mayores, y por otro lado, fenómenos meteorológicos atípicos, donde hay fuertes lluvias en lugares o épocas no consideradas previamente y que han tenido efectos catastróficos, o quizá huracanes sin precedentes o sequías de trascendencia fatídica.

Desde luego que se señala como una causa prioritaria de todo ello, el intenso consumo de combustibles fósiles a la par de innumerables acciones de naturaleza humana (consumismo y complejos sistemas de vida y de producción de bienes y satisfactores), que llevan a enfrentar estos

problemas que nos mantienen en un círculo viciosos, puesto que no ha sido sencillo plantear alternativas de solución para ello. Aunado, claro está, a la resistencia social al cambio, así como la reducida concientización del problema climático y la decisión gubernamental pero también personal, que debemos hacer un cambio relevante en todas las esferas de acción antrópicas.

Es común en las ciudades (por ejemplo, en la ciudad de México) que las temperaturas ambiente sean cada vez mayores. Con frecuencia escuchamos haber alcanzado temperaturas históricas o récord que nunca antes se habían alcanzado. Cuando se efectuó el XXII Encuentro de Mujeres en las Ciencias, en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Óptica en la ciudad de León, Guanajuato (hacia 21-23 de mayo de 2025), ocurrió la primera lluvia intensa del año, a la par de temperaturas elevadas. Una de las asistentes originaria de Reynosa, Tamaulipas, compartió que una semana antes, habían estado en su región a 48°C a la sombra, como ejemplo de lo ya referido.

En el medio urbano además, la contaminación ambiente, partículas suspendidas, poca humedad residual, hace que haya más calor, que aunado a la radiación solar directa, así como el reflejo de la misma en superficies como el pavimento, azoteas, hace que sea aún mayor la temperatura, la sensación térmica y los efectos del calor (Vazquez-Alvarado *et al*., 2010).

Las noticias que imperan en tiempos de calores, hacia las zonas norteñas del país, generalmente cursan con crisis hídrica, e incluso con la muerte de animales, principalmente domésticos (ganado mayor, productor de carne tipo *bos taurus*), el cual no resiste estas condiciones y sucumbe ante ellas. Sin embargo, es muy importante buscar y encontrar alternativas, mecanismos por los cuales no caigamos en ecoestrés y desesperanza, ante las temperaturas cada vez mayores y sus efectos deletéreos. Es por ello, que es necesaria una serie de medidas creativas y disruptivas para si bien reconocer que ya estamos inmersos en esta situación, podamos crear la oportunidad deseada.

Por otro lado, las cactáceas con adaptación al calor y reducido consumo de agua, pueden ser una alternativa importante, para la producción de alimentos en la era del calentamiento global en especial el caso del nopal. El cual es posible producir en macetas (Imagen 1). Por ello es que hemos analizado y experimentado esta condición de cultivo, la cual una vez comprobada, ahora queremos difundirla puesto que estas condiciones de aumento del calor y crisis hídrica, al parecer llegaron para quedarse y son un situación generalizada en la mayor ´parte del territorio nacional (López-Chavez, *et al*., 2012).

Imagen 1. Nopales en azotea en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México.

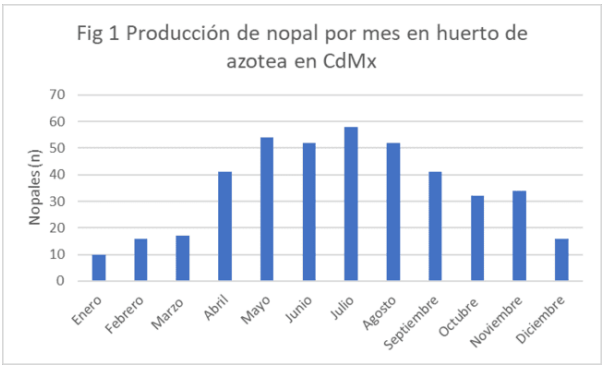
PARTE EXPERIMENTAL

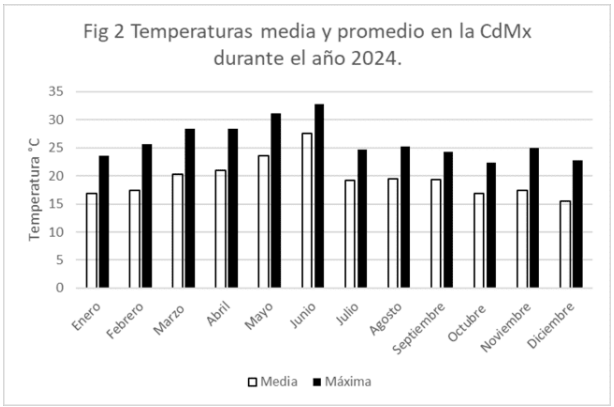
Se estableció un cultivo de nopal en azotea (48 macetas en 2m^2) cada una de ellas de 16 cm de diámetro y 16 cm de profundidad con sólo un cladiodo. Con sustrato (tierra 2/3 y composta 1/3), la cual se renovó cada 3 meses en la parte superficial del sustrato (de 3 a 5 cm).

El riego se hizo dos o tres veces a la semana, según se requería, con 4 litros de agua/riego contando para ello con reserva de agua pluvial cosechada un año antes. Al detectar los brotes de los cladiodos se registraron y se observó su desarrollo. Se midió el largo y ancho de cada uno de ellos, con un vernier, hasta su crecimiento y que fueran aptos para consumo y se calculó la superficie vegetal obtenida con la fórmula de un ovoide, esto es calculando inicialmente el diámetro multiplicando el rradio de los dos ejes y finalmente multiplicando el diámetro por 3.1416 para determinar la superficie. Se registró el total de nopales cosechados cada mes. Finalmente se obtuvieron las temperaturas medias y promedios mensuales durante el año pasado en la CdMx, en la página oficial de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA. 2024) y se comparó con la producción de nopal en azotea en maceta.

RESULTADOS

El 33% de los brotes registrados permaneció en estado latente, mientras que el 67% alcanzó el tamaño para consumo en 35 días. El tamaño inicial del cladiodo fue de 3.9±1.4 x 6.6±3.2cm (largo x ancho, superficie 22.9cm^2) y en corte de 8.7±0.6 x 16.9±2.8cm (superficie de 116.1cm^2), lo que representó un aumento de superficie de 811%. La mayor producción ocurrió en meses de alta insolación (>19°C, abril a septiembre) con 49 cladiodos por mes contra 25 en meses con temperaturas menores (Fig 1 y 2).





DISCUSIÓN

Es necesario comenzar a realizar actividades disruptivas que ayuden a contender con algunos de los graves problemas ambientales como lo es el calentamiento global. En ello observar nuestro estándar de consumo y en especial ser conscientes de la situación a través de la adquisición del conocimiento relacionado, así como la toma de decisión más conveniente, con el convencimiento pleno de la mejora a la contingencia que enfrentamos. La crisis del calentamiento global aunada a la crisis hídrica son dos fenómenos de relevancia. Por otro lado, la producción de alimentos a través de un pequeño huerto de azotea colabora a paliar esos fenómenos, pero además nos procura alimento y terapia de ocupación, así como una valiosa oportunidad de vincularnos con la naturaleza y sus procesos. El modelo propuesto en el presente trabajo es simple, partiendo de macetas comerciales así como la adición de composta que en nuestro caso es de elaboración propia, pero que además se podría conseguir si fuera necesario. Los cladiodos (tamaño pequeño) son también de fácil adquisición.

Se sugiere solo un cladiodo por maceta, considerando que los nutrientes (minerales y agua) sean solo para sostener éste y a partir del segundo cladiodo sean para consumo, teniendo el mínimo gastgo de mantenimiento del soporte vegetal de producción.

En el presente trabajo se encontró que algunos brotes (33%) permanecen latentes, hasta la mejor condición para su desarrollo, mientras que el 67% progresan de manera continua hasta alcanzar el tamaño deseado para su corte y consumo (8.7 x 16.9cm promedio, largo por ancho). Esta medida de cladiodo se determinó bajo la observación que es cuando comienzan a su vez a producir nuevos brotes y con ello la constitución de la fibra constitutiva tiende a endurecerse para soportar al nuevo cladidodo y demerita la textura para su consumo. Por su parte Vázquez-Alvarado *et al*., 2010, obtienen nopales en azotea de mayor tamaño (hasta 19 cm de largo) pero trabajan variedades comerciales y en sistema hidropónico.

En tiempo de mayor insolación el crecimiento desde brote hasta cladiodo de corte s alcanza en 35 días, con un crecimiento de masa de 811%, lo que da cuenta de la intensidad del sistema de producción favorecido por la intensa insolación, así como el adecuado sustrato, disponibilidad de nutrientes de la composta y el aporte hídrico. Cabe recordar que cada 3 meses su substituye una parte del sustrato (de 3 a 5 cm de la superficie) por composta nueva para mantener el sistema de producción de forma óptima.

Es interesante ver que la producción en la superficie de $2m^2$ proveyó 423 nopales en un año, de los cuales 269 (64%) fueron obtenidos de marzo a noviembre. A mayor insolación (>19°C) se obtuvo mayor producción de nopal con un promedio de 49 cladiodos de corte al mes.

Es también importante observar que las curvas de producción mensual de nopal y la de temperaturas promedio y máximas alcanzadas en la CdMX tienen una tendencia similar, esto es cuando aumenta la temperatura lo hace la producción y viceversa. Este comportamiento es el principal que quisiéramos enfatizar puesto que el sistema puede llevarse a cabo de manera eficiente aun con alta insolación directa y reflejada.

Son muy conocidos los beneficios a la nutrición que proveen los nopales, entre ellos el aporte en fibra, carbohidratos, vitaminas y minerales. Además de consumirlos en diversos guisos o incluso solos, por ejemplo, azados.

Finalmente es importante señalar que la producción de nopal en azotea cumple también una importante función de terapia de ocupación, que se puede combinar con otras verduras, plantas medicinales u ornamentales. En la imagen 1, se podrá apreciar que de manera espontánea, en el periodo de lluvias llega semilla de otras plantas entre las cuales podemos ver epazote y quelite, y también tener estas plantas asociadas, las cuales sirven además como importantes indicadores de estrés hídrico, dado que el cladiodo al ser muy resiliente no lo manifiesta. Esta lectura puede ayudar en decidir la frecuencia de los riegos. La humedad residual en este sistema es limitada dado que si

bien en la época de lluvias aumenta, la insolación directa y reflejada es muy intensa y luego de una lluvia un cielo nítido puede ocasionar rápidamente la perdida de la humedad del sustrato, detectado enlas hojas de las plantas asociadas. Además de señalar que durante un año de cultivo de nopal en azotea no se tuvieron plagas que afectaran la producción, lo que refuerza la elegibilidad de esta planta para este sistema de producción.

CONCLUSIÓN

La producción de nopal en maceta y en azotea en zona urbana de la CdMx, aumenta conforme lo hace el calor ambiental, lo que puede ser importante para la producción de alimentos y atenuar el calentamiento global, aportando inte´res social para la creación y conservación de azoteas verdes productoras de satisfactores que contiendad con los cambios actuales calentamiento global y crisis hídrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Montes de Oca, (2014) Centro de procesamientos e investigación de nopal verdura en Milpa Alta, CdMx. Tesis Arquitectura UNAM. 120pp.
2. O. López-Chavez, I. Sosa Tinoco, D. López López, J.D. Beltrán Ramirez, D. Moreno Cozarit, L.A. García López, F.E. Montaño Salas, H. Aceves Gutiérrez y F. Encinas Pablos (2012) Implementación del Sistema de Azotea Verde en viviendas de interés social para la reducción de la carga térmica hacia el interior de las edificaciones. Revista La Sociedad Académica, núm. 39 (enero-junio 2012):175-183.
3. R. E. Vázquez-Alvarado, R.D. Valdez-Cepeda, F. Blanco-Macías, M.C. Ojeda-Zacarías, J.R. Martínez López (2010) Producción hidropónica de nopal verdura RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición, Edición Especial No. 5-2010 (ISSN 18700160): 15-36

SITUACION ACTUAL DE LOS ENVASES GENERADORES DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN EL CULTIVO DE PIÑA (*Ananas Comosus* L)

José Armando Vidal Herrera[1], María Del Refugio Castañeda Chávez [1], Juan Valente Megchún García[1] , GabyCarmen Navarrete Rodríguez [1], Isabel Araceli Amaro Espejo [1].

[1]TecNM/Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México.
armando13vidal@gmail.com

RESUMEN

Los envases de plaguicidas son un problema grave para el medio ambiente, dicho residuo peligroso tiene afectaciones en agua y en el suelo por sus características y su contenido químico, utilizado de manera común en la agricultura1. Los envases también pueden llegar a ser un problema para la salud de las personas que están en contacto con ellos, ya que manipularlos sin ninguna protección correcta se pueden presentar daños a la piel; además, que los envases suelen ser quemados junto con el rastrojo del cultivo o utilizados para uso doméstico2. El objetivo de la investigación es determinar el daño ambiental y a la salud pública por la presencia de envases generadores de residuos peligrosos causado por envases de plaguicidas con mal manejo en las parcelas de los productores de piña. La investigación fue desarrollada en la comunidad de los Robles, Medellín de Bravo, Veracruz, con cultivadores de Piña, para la recopilación de la información sobre plaguicidas y sus envases, se realizó una encuesta a los productores de piña de la zona, desarrollando un cuestionario de preguntas abiertas y cerradas, las variables tomadas para la encuesta fueron acerca del uso de insecticidas, fungicidas, fertilizantes foliares y hormonas, además, se recabó información sobre que hacen con sus envases de plaguicidas una vez utilizados y su disposición final, posteriormente con la información recabada se realizó un análisis de los datos en la paquetería Excel para Microsoft 365 versión 2501. Los resultados arrojaron que los agricultores usaban mucho el insecticida Dimetoato (56%), el fungicida con el Tia-Bendazol (31%), entre los fertilizantes Foliares más utilizados el Ácido Fosfórico (31%) y compuestos a base de nitrógeno y hormonas con el ingrediente activo de Citocininas (37%). Respecto al manejo de envases de plaguicidas, la encuesta nos indica que mas del 50% de los productores no la almacenaba y más del 30% contaba con una bodega especial para guardarlos, pero sin un correcto manejo de ellos. El 40% de los productores arrojaban sus envases a la basura sin ninguna correcta limpieza de ellos, y más del 30% de los productores quema los envases junto con el rastrojo del cultivo de la piña. Se concluye que los productores de piña de los Robles están utilizando plaguicidas de manera no controlada, de igual manera, no realizan el triple lavado, ya que es importante dar a conocer y concientizar a las personas el daño que causan al medio ambiente y a la salud pública que están en contacto directo o indirecto con los envases de plaguicidas.

INTRODUCCIÓN

Los envases de plaguicidas son recipientes de plástico diseñados para contener, transportar y almacenar químicos utilizados para el sector agrícola. Sin embargo, su gestión adecuada es crucial para prevenir riesgos ambientales y a la salud humana. Los envases pueden ser de diferentes materiales, como plástico, metal o vidrio, y deben cumplir con normativas específicas para evitar fugas, contaminación y uso indebido [2]. Los envases de plaguicidas son un problema grave para el medio ambiente, dicho residuo peligroso tiene afectaciones en agua y en el suelo por sus características y su contenido químico, utilizado de manera común en la agricultura. Los envases también pueden llegar a ser un problema para la salud de las personas que están en contacto con ellos, ya que manipularlos sin ninguna protección correcta se pueden presentar daños a la piel; además, que los envases suelen ser quemados junto con el rastrojo del cultivo o utilizados para uso doméstico [1].

Es por eso que es importante conocer todas las regulaciones que existen referentes a los plaguicidas, para de esta manera, tener un control sobre cómo se deben de manejar y las medidas de seguridad que se deben de seguir para evitar contaminar más el entorno en donde se van a aplicar los químicos. Algunas comunidades de productores buscan exportar los productos que cosechan, para estos casos se llevan a cabo varios puntos que se deben de cubrir para que esto sea posible, entre algunos puntos están la regulación de plaguicidas utilizados en el cultivo, es decir, que se tienen que aplicar productos químicos que estén aprobados para otros países, además de regular la cantidad de plaguicida que se tenga que aplicar, agregado a eso, se debe de tener un control de envases de plaguicidas utilizados, esto quiere decir que debe de haber centros de acopios temporales en la zona donde se desea exportar y así mismo llevar un control sobre la cantidad de envases de plaguicidas que se van a disponer para aplicarles un reciclaje adecuado, en México según menciona [12] la autoridad que se encarga de ver los procesos que se siguen de los envases de plaguicidas una vez tratados es la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFREPIS). Por lo cual el objetivo de este proyecto es desarrollar un plan de gestión de envases de plaguicidas utilizados en la comunidad de los Robles, en Medellín de Bravo en Veracruz, con un grupo de productores de piña de la zona, ya que esta comunidad está comenzando a tratar de exportar sus productos a otras zonas, sin embargo, están interesados en regularizarse con las normativas especificadas del gobierno de México para que sus productos puedan estar en la línea positiva para su exportación.

TEORÍA

Plaguicidas

Son insumos que previenen, repelen o controlan cualquier plaga de origen animal o vegetal durante la producción, almacenamiento, transporte y distribución de productos agrícolas. Pueden ser altamente tóxicos para las personas que estén en contacto con ellos. Una mayor producción agrícola se traduce en una reducción de costos para el consumidor final y por lo tanto en mayor acceso a los alimentos por parte de la población mundial. Los productos fitosanitarios aseguran una mayor y mejor producción de alimentos y otros cultivos en beneficio de la supervivencia y bienestar de la humanidad.[3]

Usos habituales de plaguicidas

La producción excesiva de alimentos produce un abuso de plaguicidas. Dando cabida a nuevas plagas, su práctica más empleada es la eliminación de plagas resistentes dentro de las cuales destacan los insectos, bacterias y malas hierbas.

Desafortunadamente estos herbicidas provocan un aumento en los riesgos para la salud de las personas principalmente y el ambiente y propicio estancamiento comercial (residuos).

Algunos países suelen restructurar sus políticas para reducir dichos problemas a causa de estos herbicidas y prometer de manera directa una generación eficiente de los alimentos mediante la aplicación de alternativas a los agroquímicos [2].

Residuos peligrosos

Los residuos peligrosos son aquellos compuestos químicos que, debido a sus diferentes características y propiedades, pueden causar daños a la salud de las personas o al medio ambiente. Los residuos peligrosos son producidos en México a partir de una amplia gama de actividades industriales, o de la agricultura, así como de las actividades domésticas. Los procesos industriales generan una variedad de residuos con diferentes tipos de naturaleza, que pueden contar con alguna de las siguientes características: corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, y pueden presentar riesgos a la salud humana y al ambiente, asimismo, existen otras fuentes que generan residuos peligrosos, como son los hospitales, el comercio y la minería [8].

Los residuos peligrosos pueden ser de tipo industrial, medicamentos que ya hayan caducado, residuos que se encuentran en hospitales, plaguicidas del sector agrícola que no se hayan utilizado completamente o que presenten un mal manejo, entre otros.

La clasificación y regulación de estos residuos varía según las normativas nacionales e internacionales, pero en general se consideran peligrosos cuando cumplen con alguna de las características mencionadas y representan un potencial riesgo si no se gestionan adecuadamente [7].

Centro de Acopio Temporal
Un centro de acopio temporal es un espacio designado para la recolección y almacenamiento provisional de diversos materiales, productos o recursos, generalmente en respuesta a una emergencia, evento especial o necesidad específica. Estos centros sirven como puntos de concentración donde se reciben donaciones, suministros o residuos antes de ser distribuidos, procesados o trasladados a su destino final [5].

Características principales de un centro de acopio temporal:

Ubicación estratégica: Se selecciona en zonas accesibles y seguras para facilitar la llegada y salida de personas y vehículos.

Capacidad limitada: Está diseñado para un período determinado, hasta que los recursos sean distribuidos o gestionados.

Organización interna: Cuenta con áreas específicas para clasificación, almacenamiento y distribución.

Propósito específico: Puede estar destinado a recolectar ayuda humanitaria, residuos reciclables, materiales de construcción, entre otros. Este tipo de centros son fundamentales en situaciones de emergencia (como desastres naturales), campañas sociales o proyectos ambientales, ya que permiten una gestión eficiente y ordenada de los recursos temporales [5].

PARTE EXPERIMENTAL

La investigación fue desarrollada en la localidad de los Robles, Medellín de Bravo, Veracruz, una comunidad de productores cerca del estado de Veracruz, su importante comercio se basa en la producción y venta de piñas cerca de las demás comunidades y de las personas del puerto de Veracruz que pasan cerca de la zona.

El proyecto fue desarrollado en la comunidad de los Robles, Veracruz, con cultivadores de Piña, para la recopilación de información sobre plaguicidas y sus envases, se realizó una encuesta a los agricultores de la zona, tomando cuestiones sobre el uso de Insecticidas, Fungicidas, Fertilizantes Foliares y Hormonas, a su vez, información sobre que hacen con sus envases de plaguicidas una vez utilizados y la disposición final que les realizan, posteriormente con la información recabada, se realizó un plan de gestión de manejo de residuos peligrosos en la zona para que los agricultores tuvieran una correcta disposición de los envases, tomando como primera actividad, la capacitación de la técnica de triple lavado de envases, para que puedan llevarse a centros de almacenamiento para una correcta disposición final.

El proyecto se trabajó específicamente con un grupo pequeño de productores de piña que están dentro de la localidad. En total se entrevistaron a 30 productores de la comunidad, específicamente se tomó a estas personas de referencia, ya que nos habían mencionado que estaban interesados en comenzar a exportar las piñas que producían, sin embargo, desconocían la manera correcta de llevar este proceso con todas las regulaciones correctas. Para la aplicación de la encuesta se acordó un lugar en específico, donde todos los productores estuviesen reunidos para que fuera más rápida y eficiente la recopilación de la información, los productores nos comentaron que ellos organizaban reuniones cada inicio de mes para hablar de temas referentes a sus producciones y sobre las regulaciones que estaban tratando de seguir, la encuesta duraba alrededor de 10 minutos con

preguntas concisas, desarrollando un cuestionario de preguntas abiertas y cerradas. Las variables tomadas para la encuesta fueron acerca del uso de insecticidas, fungicidas, fertilizantes foliares y hormonas, así mismo, del modo de cultivo que llevan y la manera en la que aplican los plaguicidas a sus cultivos, además, se recabó información sobre que hacen con sus envases de plaguicidas una vez utilizados y su disposición final, de igual manera se preguntó si tenían conocimiento sobre la técnica de triple lavado para envases de plaguicidas y de si estarían de acuerdo en tener una capacitación de la misma en caso de desconocer dicha técnica. posteriormente con la información recabada se realizó un análisis de los datos en la paquetería Excel para Microsoft 365 versión 2501, esto con la finalidad de estructurar de manera ordenada, los resultados arrojados dentro de la encuesta y poder tomar una mejor iniciativa sobre la gestión de los envases dentro de la zona.

RESULTADOS

Los resultados arrojados dentro de la encuesta (Figura 1) demostraron que, los agricultores usaban la mochila tipo bomba como sus sistemas de riego principal dentro de sus cultivos (50%) siendo este valor un poco más bajo al que creíamos que sería, ya que al llegar a las parcelas de los productores, no se detectaron sistemas de riego acondicionados, además un porcentaje bajo pero relevante, mencionaban que utilizaban un sistema de riego portátil (20%), esto nos daba a entender que el sistema en algunas parcelas dependía de si los productores contrataban a personas externas para poder realizar su faena, además que los resultados nos mencionaban que un 6% de los productores hacían un riego de los plaguicidas de manera manual [1], los plaguicidas al estar en contacto con la piel del productor, puede resultar en una contaminación para su salud de manera gradual, las indicaciones del gobierno del estado de Veracruz especifican los equipos de protección personal que deben de usar los agricultores al momento de aplicar los plaguicidas en su parcela para evitar estos riesgos a la salud, pero pudimos apreciar al estar en contacto con la comunidad de los Robles, que ellos no utilizaban dichos equipos.

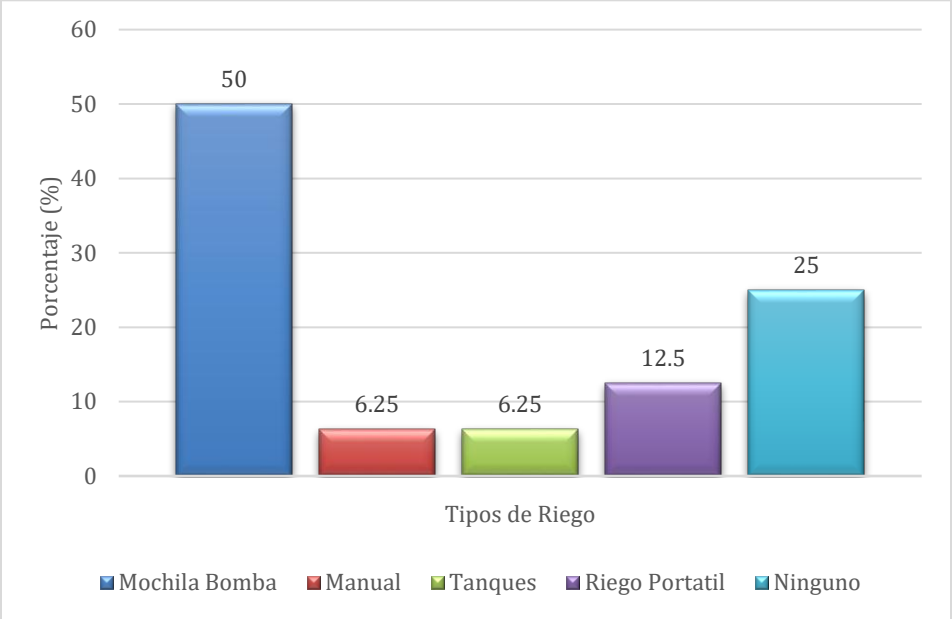


Figura 1. Sistema de riegos aplicados en los cultivos de la piña, en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

Así mismo, mencionaban dentro de la encuesta que aplicaban en mayor cantidad el insecticida Dimetoato (56%) y un (12%) Indico en la encuesta que no aplicaban ningún Insecticida, el uso habitual del Dimetoato expresado en los resultados es porque para los productores de la comunidad, es el producto comercial más accesible que tienen con los vendedores de plaguicidas, en el caso del Dimetoato [10], nos menciona que es un insecticida organofosforado de gran impacto, lastimosamente este compuesto repercute en la salud de las personas al estar inhalándolo por tiempos prolongados, además de afectar a la macrofauna edáfica considerablemente, al ser el

insecticida con mayor uso, nos indica que en la localidad de los Robles gran parte de la tierra y de las personas de la comunidad ya se encuentran afectados por este compuesto.

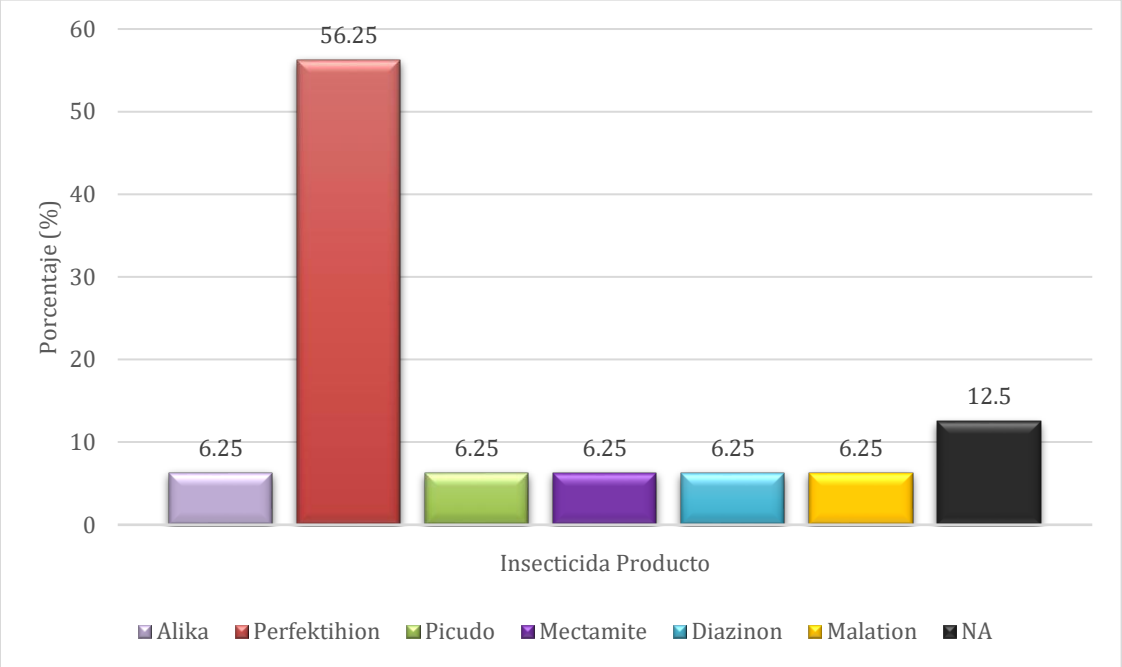


Figura 2. Insecticida más usado en los cultivos de la piña, en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

El fungicida con el compuesto activo Tia-Bendazol fue el más utilizado en las parcelas de los productores (31%), los productores mencionaban, que suelen presentar resistencia a los fungicidas utilizados, debido a eso, los agricultores suelen combinar fungicidas con una cantidad considerable de insecticidas, esto según SEMARNAT[5], puede ser un riesgo muy alto si se aplican en conjunto sin debida precaución y el 12% de los productores no utilizan ningún fungicida, ya que durante la encuesta unos productores de la comunidad especificaban usar insecticidas para tratar problemas referentes a hongos.

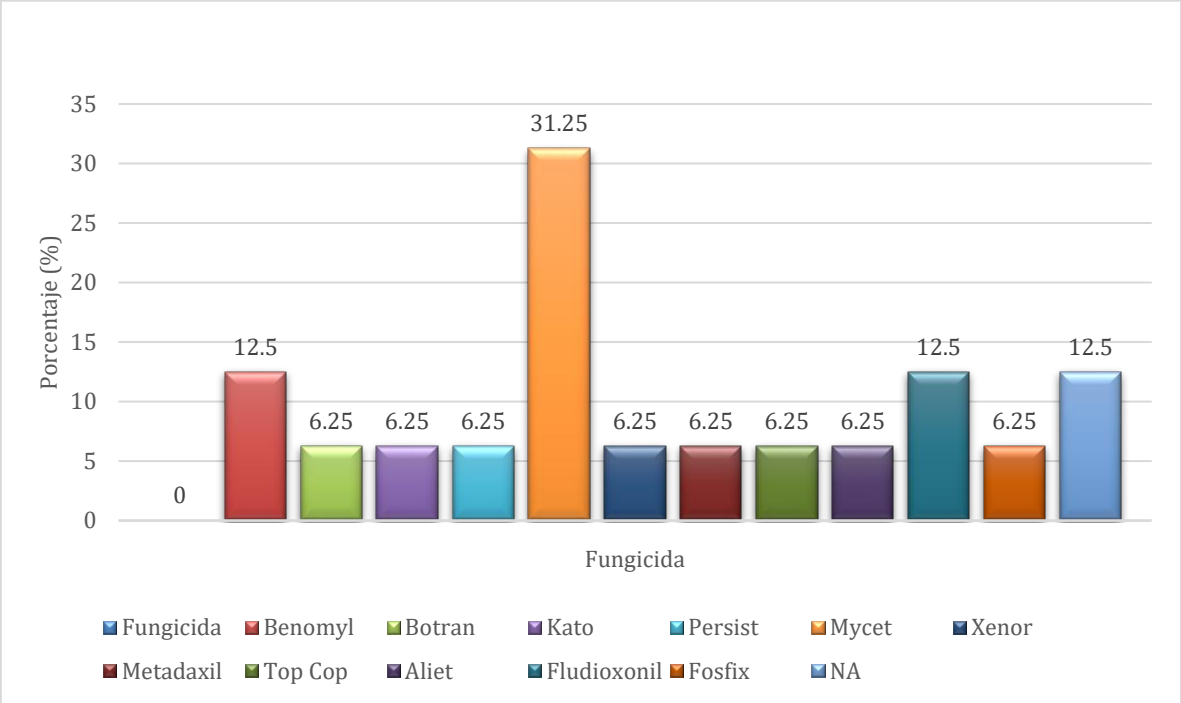


Figura 3. Fungicidas más usados en cultivo de la piña, , en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

Entre los fertilizantes Foliares (Figura 4) más utilizados el Ácido Fosfórico (31%) y compuestos a base de nitrógeno, las especificaciones de este compuesto nos mencionan que es un fertilizante usado comúnmente en suelos alcalinos y donde se aprovecha de manera eficiente sus características, según algunos productores, nos mencionaron que ellos ocupan estos fertilizantes para ayudar al desarrollo del fruto cuando tiene rasgos morfológicos visibles o cuando necesitan que el fruto tenga ciertas condiciones específicas, como el tamaño o la tonalidad de la piña.

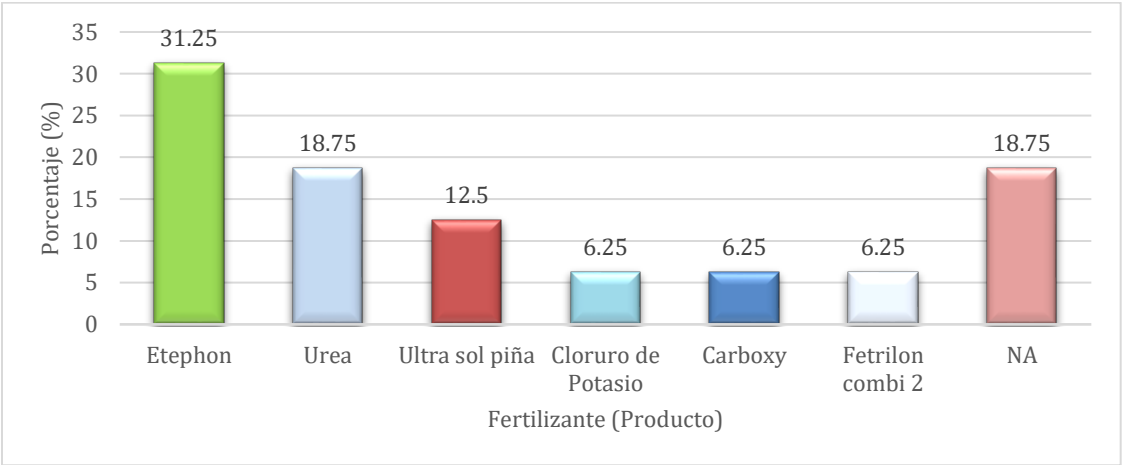


Figura 4. Fertilizante Foliar más usado en cultivo de la piña, en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

Las hormonas con el ingrediente activo de Citocininas (37%) fueron las más utilizadas dentro de las parcelas, según menciona [11], la citocina es un hormona usada comúnmente para mejorar el desarrollo de los frutos en zonas agrícolas, en este caso, los productores que usan este tipo de hormona, nos mencionan que son usadas para modificar la velocidad y la manera en que se desarrolla la piña, en algunas ocasiones la aplican durante aproximadamente una semana para que

el fruto florezca de manera más eficiente, dependiendo de la oferta y demanda del producto en esas fechas.

Respecto al manejo de envases de plaguicidas, la encuesta nos indica que más del 50% de los productores no la almacenaba y más del 30% contaba con una bodega especial para guardarlos, pero sin un correcto manejo de ellos. El 40% de los productores arrojaban sus envases a la basura sin ninguna correcta limpieza de ellos, y más del 30% de los productores quema los envases junto con el rastrojo del cultivo de la piña.

Además de realizar una entrevista sobre los plaguicidas más usados dentro de su cultivo, se les pregunto a los productores que hacían con sus envases de plaguicidas una vez utilizados, en cuestión de almacenamiento y en tema de su disposición final, los resultados se muestran en la siguiente (Figura 5):

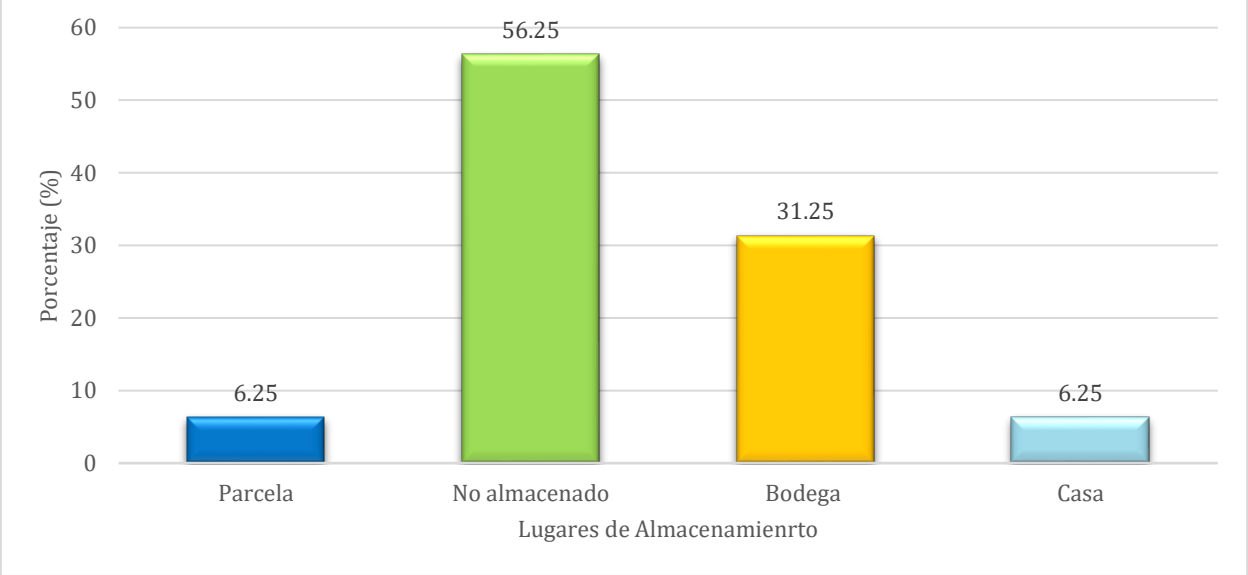


Figura 5. Lugar de Almacenamiento de envases de plaguicidas, en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

El 56% de los productores (Figura 5), mencionaba en la encuesta que no realizaban un almacenamiento de los envases, es decir, eran arrojados a la basura, o eran arrojados dentro de la parcela (6% contestaron que lo realizaban) una vez utilizados, el 31% de los agricultores mencionaba que los envases de plaguicidas los colocaban dentro de una bodega adaptada a las afueras de su casa, y el otro 6% mencionaba que los envases utilizados los almacenaban dentro de su casa cerca de la sala común.

En cuestión de la disposición final de los envases se presenta la siguiente Figura 6:

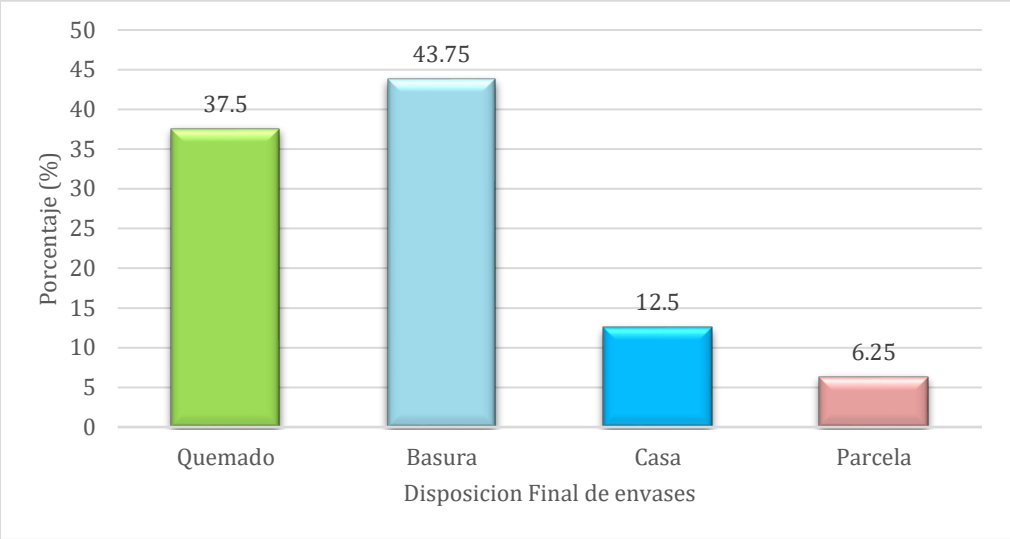


Figura 6. Disposición final de envases de plaguicidas, en los Robles, Medellín de Bravo, Ver.

Según la encuesta nos menciona que un 43% de los productores arrojaban sus envases a la basura de limpia publica para que, posteriormente, el camión recolector se los llevara de la zona, un 37% menciona que sus envases son quemados junto con el rastrojo después del día de cultivos, un 12% de los productores indican que sus envases los dejan en su casa y en algunos casos, los utilizan para consumo personal, o para macetas usadas para sus flores, o para lavar vehículos, y un 6% mencionaba que lo arrojaban en la parcela, dejando que se regara el residuo del plaguicida en el cultivo, los productores mencionan que suelen encontrarse animales muertos cerca de los cultivos, según menciona SEMARNAT [5], los envases de plaguicidas no pueden ser dispuestos a los camiones de RSU, si no que tienen que ser trasladados a un lugar previamente acondicionado para poder tratar los envases como residuos peligrosos, así mismo, deben de entregarse a empresas responsables de trasladar únicamente estos envases de plaguicidas, y deberá entregar un manifiesto, donde se indique el peso total que se está trasladando a la empresa de los envases de plaguicidas y quien estuvo a cargo del monitoreo de estos envases.

Una vez analizado los datos, se realizó una capacitación de la técnica de triple lavado, y se presentó una propuesta para instalar centros de almacenamiento temporales de envases para que los agricultores tuviesen un fácil acceso para poder almacenarlos sin llegar a contaminar sus cultivos y los lugares donde habitan. Todos los productores comentaron que desconocían el uso de dicha técnica, posteriormente se planteó la idea de darles una plática sobre la implementación de la técnica de triple lavado para el manejo de sus envases a lo que ellos estuvieron de acuerdo de llevar a cabo, se tocaron puntos importantes como el beneficio que conlleva el uso de esta técnica, la manera correcta de aplicarlo y se les menciono que es de suma importancia llevarse de manera eficiente, ya que si los productores desean exportar su producto fuera del estado o del país, por normativa se pedirá que se lleve a cabo un manejo responsable de envases de plaguicidas, así como tener un Centro de acopio temporal (CAT), para poder trasladar los envases una vez tratados adecuadamente.

CONCLUSIONES

Pudimos observar y clasificar cuales eran los diferentes tipos de plaguicidas que utilizaban regularmente, además la manera en que realizan el manejo de los plaguicidas, esto implica, la cantidad que utilizan, la manera en que lo aplican, es decir, las medidas de seguridad que llevan a cabo para su uso, el sistema que utilizan para aplicarlo en las diferentes parcelas, y que hacen con sus envases vacíos una vez que los usan. Así mismo, se logró concientizar a la comunidad de Los Robles, de Medellín de Bravo, Veracruz, sobre el grave problema que hay en sus cultivos y en la

salud el hacer un mal manejo de los envases de plaguicidas, y de no realizar una correcta técnica del triple lavado, pueden llegar a tener afectaciones graves a largo plazo sobre los productos que desean empezar a exportar, todo esto sin las regulaciones y normativas necesarias.

BIBLIOGRAFÍA

1. C.B. RUIZ, J. O., MANRIQUE, M. A., & POZO, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete. Revista Espacios, 41(10).
2. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Pesticide use in urban environments. EPA Publications.
3. FAO & WHO. (2014). Manual on the management of pesticide waste. Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization.
4. Fernández, M., & García, P. (2010). Uso y manejo de plaguicidas en la agricultura moderna. Revista de Ciencias Agrícolas, 35(2), 123-135.
5. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). "Guía para el Manejo Integral de Residuos Peligrosos". México: SEMARNAT.
6. Organización Mundial de la Salud. (2004). Guía para la evaluación del riesgo de plaguicidas. Ginebra: OMS.
7. United Nations Environment Programme (UNEP). (2011). Guidelines for the disposal of waste oils and other hazardous wastes. UNEP.
8. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). (2014). Hazardous waste management: A review of practices and policies. OECD.
9. Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. Environment, Development and Sustainability, 7(2), 229-252.
10. Oliver, J. I., Flores, L. A., La Torre, M. I., Guabloche, A., Ventura, K., Chero, J. D., ... & Yance, M. C. (2015). Toxicidad aguda y crónica de Tagetes elliptica (Asteraceae) y dimetoato sobre depredadores y parasitoides de plagas de importancia agrícola en Perú. The Biologist, 13(2), 329-347.
11. Ramírez, H., Peralta-Manjarrez, R. M., Benavides-Mendoza, A., Sánchez-López, A., Robledo-Torres, V., & Hernández-Dávila, J. (2005). Efectos de prohexadiona-Ca en tomate y su relación con la variación de la concentración de giberelinas y citocininas. Revista Chapingo Serie Horticultura, 11(2), 283-290.
12. Esquivel-Valenzuela, B., Cueto-Wong, J. A., Valdez-Cepeda, R. D., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., & Pérez-Veyna, Ó. (2019). Prácticas de manejo y análisis de riesgo por el uso de plaguicidas en la Comarca Lagunera, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 35(1), 25-33.

EFECTO DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE FLORES DE FRIJOL AYOCOTE SILVESTRE

Marlenne Y. Lima-Silva[1,2], Stephany Alvarado-Velásquez[1,2], Orlando Arellano-Castillo[3], Armando J. Martínez-Chacón[4], Elvia Cruz-Huerta[1]

[1] Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Av. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, Xalapa-Enríquez 91193, Veracruz, México. [2] Facultad de Nutrición-Xalapa, Médicos y Odontólogos s/n, Unidad del Bosque, Xalapa 91017, Veracruz, México. [3] Centro de Investigaciones Biomédicas, Universidad Veracruzana, Av. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, Xalapa 91193, Veracruz, México. [4] Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana, Av. Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, Xalapa 91193, Veracruz, México.

marlenneyadaril@gmail.com

RESUMEN

Las flores comestibles representan una fuente valiosa de compuestos fenólicos, los cuales confieren propiedades antioxidantes con potenciales efectos benéficos para la salud humana. Sin embargo, el proceso de cocción y la digestión pueden influir sobre el contenido de estos compuestos, su bioaccesibilidad y bioactividad. En este contexto, las flores de frijol ayocote silvestre (*Phaseolus coccineus* L.) destacan por sus características organolépticas y su composición nutricional, aspectos de interés tanto en la gastronomía como para la industria farmacéutica. Estas flores tienen un diámetro que varía entre 1 y 2 cm y presentan tonalidades desde rojo brillante hasta escarlata y naranja. A pesar de su uso tradicional y del creciente interés en las flores silvestres comestibles como alternativa alimentaria para mejorar la seguridad nutricional, el conocimiento acerca del contenido de sus compuestos bioactivos y las transformaciones que sufren durante el procesamiento y la digestión sigue siendo limitado. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la digestión gastrointestinal simulada sobre la actividad antioxidante de los compuestos fenólicos de las flores de frijol ayocote silvestre. Para ello, se recolectaron pétalos de flores de frijol ayocote silvestre, los cuales fueron sometidos a cocción por vapor durante 3 minutos, simulando un método de consumo tradicional. Las muestras de flores crudas y cocidas fueron liofilizadas y posteriormente pulverizadas. A partir del polvo de las flores se realizó la optimización de extracción de compuestos fenólicos empleando soluciones etanol/agua y metanol/agua variando las proporciones de solvente y tiempo de agitación. Las muestras de flores cocidas se sometieron a un proceso de digestión gastrointestinal simulada siguiendo el protocolo INFOGEST, que incluye las fases oral, gástrica e intestinal. Se determinó el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) mediante el método de Folin-Ciocalteu, el contenido de antocianinas monoméricas (AM) mediante el método de pH diferencial y la actividad antioxidante se evaluó a través de los ensayos ABTS y DPPH. Se utilizó una mezcla de etanol/agua (70:30 v/v) para la extracción, ya que este sistema resultó ser el más eficiente. El extracto de flores crudas mostró un mayor contenido de CFT (11.24 mg EAG g^{-1}) y AM (4.84 ± .48 C3G g^{-1}). En cambio, el extracto de flores cocidas mostró una mayor actividad de eliminación de radicales ABTS (93.09%) en comparación con el extracto de flores crudas (86.79%). Por otro lado, la fase intestinal mostró la mayor concentración de CFT (24.16 mg EAG g^{-1}). Sin embargo, tras la digestión intestinal, el contenido de AM disminuyó un 97%. En los ensayos de actividad antioxidante, los digeridos oral e intestinal exhibieron la mayor capacidad de eliminación de radicales ABTS (IC_{50} = 197.8 ± 11.76 y 179.8 ± 4.34 µg mL^{-1}, respectivamente) y en el ensayo DPPH, fueron la fase oral y gástrica (IC_{50} =182.8 ± 11.8 y 157 ± 14.03 µg mL^{-1}, respectivamente). Por lo tanto, el consumo de las flores de frijol ayocote silvestre podría ser una estrategia complementaria en el tratamiento antioxidante para prevenir o controlar enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ENT), como las cardiovasculares, la diabetes tipo 2 y diversos tipos de cáncer, representan un desafío para la salud pública a nivel mundial. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, las ENT son responsables del 71% de las muertes anuales a nivel global (OPS, 2025). Un mecanismo fisiopatológico clave en su desarrollo es el estrés oxidativo, que se caracteriza por un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y los sistemas antioxidantes endógenos del organismo. Las ROS, como el anión superóxido (O_2^-), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el radical hidroxilo (•OH), son moléculas altamente reactivas que pueden inducir peroxidación lipídica, daño proteico y alteraciones genéticas, contribuyendo al desarrollo y progresión de múltiples patologías (San-Miguel & Martin-Gil, 2009).

En los últimos años, existe un creciente interés en el desarrollo de alimentos funcionales con capacidad para modular procesos fisiológicos y contribuir a la prevención de ENT, particularmente aquellos ricos en compuestos bioactivos. Dentro de este grupo, las flores comestibles se consideran una fuente importante, debido a su alto valor nutricional y su contenido en vitaminas, minerales, aceites esenciales y metabolitos secundarios con diversas propiedades biológicas, incluyendo, actividad antioxidante, antihiperglucémica y anticancerígena (Takahashi et al., 2020).

Las flores comestibles han sido valoradas por su color, aroma, textura, perfil nutricional y su uso tradicional en la medicina popular. Su versatilidad ha permitido su incorporación en una amplia gama de preparaciones gastronómicas, incluyendo sopas, ensaladas, infusiones, postres y salsas. Desde el punto de vista nutricional y fitoquímico, estas flores destacan por su riqueza en compuestos fenólicos, particularmente flavonoides como las antocianinas, ácidos fenólicos y estilbenos, los cuales se asocian con una alta capacidad antioxidante (Gullón et al., 2015). Las antocianinas confieren las tonalidades rojas, moradas y azules características de muchos pétalos, y actúan como potentes eliminadores de ROS, contribuyendo significativamente a la protección celular frente al daño oxidativo (Kähkönen et al., 1999). La concentración y el perfil de estos compuestos pueden variar considerablemente según diversos factores como la especie vegetal, el estado de madurez y las condiciones agronómicas durante el cultivo (Butkhup & Samappito, 2008).

Diversos estudios han demostrado que el consumo de flores comestibles con alto contenido en polifenoles puede contribuir significativamente a contrarrestar el estrés oxidativo y a reducir el riesgo de enfermedades crónicas asociadas al envejecimiento celular, incluyendo ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y trastornos neurodegenerativos (Coyago-Cruz et al., 2024). Estos efectos benéficos se atribuyen principalmente a la capacidad de los polifenoles para neutralizar especies reactivas de oxígeno y modular rutas celulares involucradas en procesos inflamatorios y oxidativos. Sin embargo, para validar su eficacia funcional en condiciones fisiológicas, es esencial considerar su estabilidad y transformación durante la digestión, particularmente su bioaccesibilidad, definida como la fracción de compuestos que es liberada y solubilizada en el tracto intestinal, disponible para su absorción sistémica (de Morais et al., 2020).

En este contexto, las flores comestibles silvestres representan una estrategia para el desarrollo de alimentos funcionales sostenibles, debido a su elevado contenido de compuestos bioactivos, especialmente polifenoles como las antocianinas, que contribuyen a su capacidad antioxidante (Pinedo-Espinoza et al., 2020). En consecuencia, el presente estudio evaluó el impacto de la digestión gastrointestinal simulada sobre el contenido fenólico total y la actividad antioxidante de extractos de flores de frijol ayocote silvestre (*Phaseolus coccineus* L.), con el fin de estimar su viabilidad funcional en contextos dietéticos reales.

TEORÍA

Potencial funcional de las flores comestibles

El consumo de flores comestibles ha sido documentado en diversas culturas alrededor del mundo desde tiempos ancestrales, tanto con fines culinarios como medicinales. En las últimas décadas, el

interés científico y gastronómico por estas flores ha crecido sustancialmente, impulsado por la demanda de alimentos naturales con propiedades funcionales. Aunque solo una fracción del total de especies florales es considerada segura para el consumo humano, aquellas clasificadas como comestibles se han asociado con múltiples beneficios a la salud. Investigaciones recientes han informado que estas flores contienen fitonutrientes y metabolitos secundarios con efectos ansiolíticos, anticancerígenos, antidiabéticos, antiinflamatorios, antimicrobianos y antioxidantes, lo que las posiciona como ingredientes funcionales potenciales en la prevención y manejo de enfermedades crónicas no trasmisibles (Pires et al., 2021; Meneses et al., 2024).

Flores de frijol ayocote silvestre

La flor del frijol ayocote silvestre (*Phaseolus coccineus* L.), también conocida como flor de xaxana, es una especie nativa de Mesoamérica con una amplia distribución en México. Ha sido registrada en estados como Chiapas, Durango, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz. Su floración ocurre durante la temporada de lluvias (junio a septiembre), y se caracteriza por su notable adaptabilidad, crece en hábitats ruderales, matorrales, pastizales y bosques de pino-encino. Estas flores crecen en una planta tipo enredadera que puede alcanzar varios metros de longitud y produce flores papilionáceas de entre 1 y 2 cm, con tonalidades rojo brillante, escarlata, naranja o rojo-purpúra. La estructura floral incluye cinco pétalos: un estandarte superior, dos alas laterales y una quilla inferior fusionada, similar a la de otras leguminosas (Figura 1). El fruto resultante es una legumbre conocida como frijol de ayocote, apreciado por su valor nutricional y su tamaño superior al promedio (Heike-Vibrans & Mondragón-Pichardo, 2009).

En la cocina tradicional mexicana, las flores del frijol ayocote han sido utilizadas durante siglos como ingrediente en una amplia variedad de platillos regionales, apreciadas por su sabor, aroma, atractivo visual y propiedades medicinales. Su empleo culinario abarca diversas formas de preparación y métodos de cocción, incluyendo cocción al vapor, hervido, salteado o en combinación con alimentos básicos como frijoles y huevos. Además del uso de las flores, también se consumen las vainas tiernas y las semillas, lo que convierte a esta planta en una fuente alimentaria integral, especialmente valorada en comunidades rurales de México y Centroamérica (Mulík & Ozuna, 2020).

Figura 1. Inflorescencias del frijol ayocote silvestre (*Phaseolus coccineus* L.), con flores de color rojo escarlata intenso, dispuestas en racimos axilares. Estas estructuras florales son altamente valoradas por su potencial funcional, que se atribuye a su elevado contenido de antocianinas y por su uso tradicional en la gastronomía mexicana.

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal y preparación de muestras

Se recolectaron flores frescas de frijol rojo (*Phaseolus coccineus* L.) en Altotonga, Veracruz, México (19°46′39"N, 97°06′50"O) durante el mes de octubre de 2024. El material vegetal se dividió en dos condiciones de procesamiento: una porción se sometió a cocción al vapor durante 3 min a 95-100 °C y otra se mantuvo en fresco. Ambas muestras fueron posteriormente liofilizadas (Labconco FreeZone 6, EE.UU.) y molidas en un molino pulverizador de alta velocidad (ENCAMEX, MC-100, Ciudad de México, México). El polvo resultante se tamizó a través de una malla de 500 µm, se selló al vacío y se almacenó a -80 °C hasta su uso.

Optimización de la extracción de compuestos fenólicos

Las condiciones de extracción se optimizaron con base en el método descrito por Ortega-Hernández et al. (2023), con una proporción de sólido a solvente de 1:50 (p/v) utilizando mezclas de metanol-agua (70:30 v/v) o etanol-agua (70:30 v/v). Las extracciones se realizaron a 70 °C, 400 rpm durante 10 min. A continuación, las muestras se centrifugaron a 16,000 × *g* durante 10 min, y los sobrenadantes se filtraron a través de papel Whatman Nº 1. Los extractos se utilizaron para determinar el contenido fenólico total (TPC) por el método de Folin-Ciocalteu. Antocianinas monoméricas por el método diferencial de pH y actividad antioxidante mediante ensayos de barrido de radicales DPPH y ABTS. En la Figura 2 se muestra un esquema general de trabajo de los procedimientos que se llevaron a cabo en la parte experimental de esta investigación.

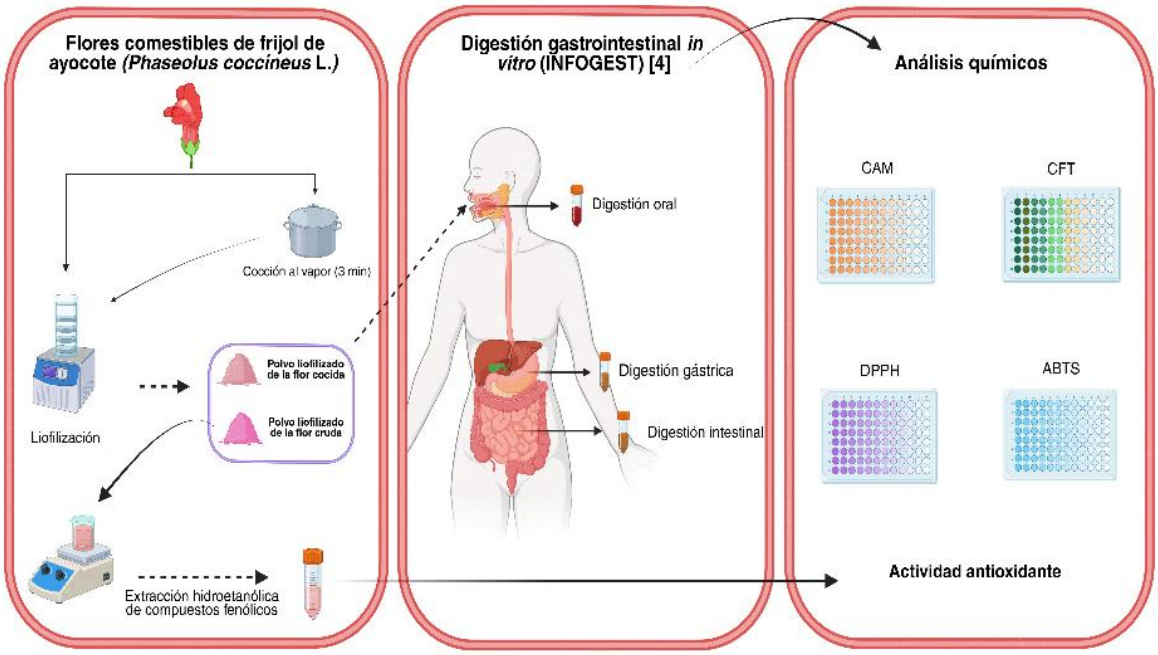


Figura 2. Esquema general de trabajo para el análisis de flores de frijol ayocote (*Phaseolus coccineus* L.). Las flores fueron sometidas a cocción al vapor durante 3 minutos, liofilizadas y procesadas para la obtención de extractos. Estos extractos se sometieron a digestión gastrointestinal in vitro, siguiendo el protocolo estandarizado de INFOGEST. Los digeridos obtenidos fueron analizados por espectrofotometría para cuantificar el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), antocianinas monoméricas (CAM) y la capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH y ABTS.Creado en BioRender. Cruz Huerta, E. (2025) https://BioRender.com/pdbqb4z

Digestión gastrointestinal in vitro

La digestión gastrointestinal in vitro de las flores de frijol ayocote se realizó de acuerdo con el protocolo estandarizado de INFOGEST (Brodkorb et al., 2019) que incluye las fases: oral, gástrica e intestinal (Figura 3). Las enzimas y reactivos que se utilizaron en el proceso de la digestión gastrointestinal in vitro se adquirieron de Merck, Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, USA). En la fase oral, el polvo de la flor cocida y liofilizada se mezcló con fluido salival simulado (SSF) el cual contenía amilasa salival (75U/mL), en una proporción 1:1 (p/v) y pH 7. La mezcla se incubó durante 2 minutos a 37 °C con agitación a 150 rpm. Para la fase gástrica se agregó fluido gástrico simulado (SGF) en una relación 1:1 (v/v) el cual contenía pepsina (2000 U/mL) a un pH de 3 y se incubó durante 2 horas a 37 °C con agitación a 150 rpm. En la fase intestinal se agregó fluido intestinal simulado (FIS) que contenía bilis y pancreatina, a un pH de 7, posteriormente se incubó a 37 °C con agitación, durante 2 horas. Para detener la actividad enzimática se añadió Pefabloc® SC. Los digeridos fueron centrifugados a 5,000 *g* a 4 °C durante 30 minutos, se liofilizaron y almacenaron a -80 °C hasta su uso.

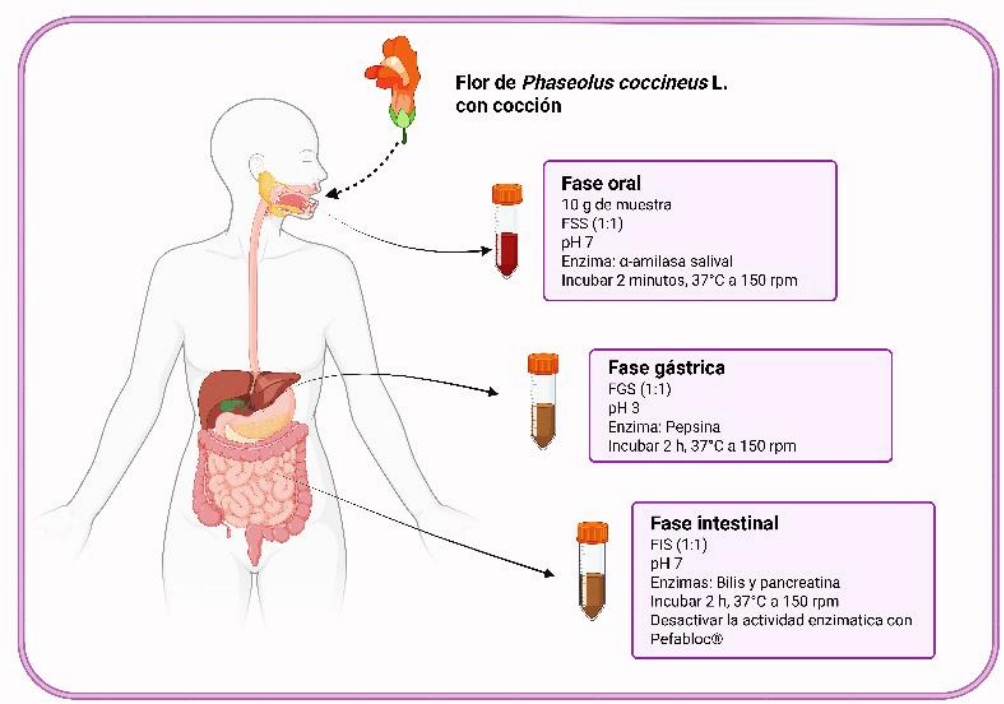


Figura 3. Representación esquemática del proceso de digestión gastrointestinal in vitro. Se empleó el protocolo estandarizado INFOGEST, que comprende tres fases secuenciales: oral, gástrica e intestinal. Cada etapa simula las condiciones fisiológicas del sistema digestivo humano, como la temperatura, el pH y la actividad enzimática. Creada en BioRender. Cruz Huerta, E. (2025) https://BioRender.com/pdbqb4z

Cuantificación de compuestos fenólicos totales (CFT)

Para el análisis de los compuestos fenólicos totales se siguió la metodología de Folin-Ciocalteu según el protocolo descrito por Espinosa Leal et al. (2015). Primero se preparó una curva patrón de ácido gálico a 1000 ppm a partir de 10 mg de ácido gálico en 10 mL de agua destilada. Después, en una placa de 96 pocillos se añadieron 20 µL de la muestra en diluciones con diferentes concentraciones, posteriormente se añadieron 100 µL de reactivo Folin-Ciocalteu 1 N y se dejó reposar durante 5 minutos. Finalmente se añadieron 80 µL de una solución de carbonato sódico al

7.5%, se incubó durante 90 minutos a 37°C y se leyó a una longitud de onda de 765 nm en un espectrofotómetro de placa (Multiskan GO Thermo Scientific, Vantaa, Finlandia).
Contenido de antocianinas monoméricas totales (CAM)

Las antocianinas monoméricas totales se determinaron por el método de pH diferencial (AOAC 2005.02). En una placa de 96 pocillos se colocaron 60 µL del extracto tanto crudo como cocido y se le adicionó 240 µL de buffer a pH 1 (0.025M de cloruro de potasio). Por otro lado, se colocaron 60 µL del extracto crudo y cocido y se le adicionó 240 µL de buffer a pH 4.5 (0.4 M de acetato de sodio), se dejó incubar a temperatura ambiente durante 20 minutos y se leyó la absorbancia a 520 y 700 nm utilizando un lector de microplacas (Multiskan FC modelo IVD, Vanta, Finlandia). Las antocianinas totales se expresaron en mg de equivalentes de cianidina-3-glucósido por gramo (mg C3GE/g), utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{\boldsymbol{A\ x\ MW\ x\ DF\ x\ 10^3}}{\boldsymbol{\varepsilon\ x\ 1}}$$

Donde A= (A520nm – A700nm) pH1.0 - (A520nm – A700nm) pH 4.5, MW= Peso molecular para cianidina-3- glucósido 449.2 g/mol, DF= Factor de dilución (1:5), ε= Coeficiente de extinción molar 26 900 L·mol1 ·cm-1 para cyd-3-glu, 1= longitud de paso de la cubeta en centímetros.

Determinación de actividad antioxidante por ABTS

Este procedimiento se realizó siguiendo la metodología descrita por Re et al. (1999) con ligeras modificaciones. El radical monocatión ABTS•+ se generó haciendo reaccionar el ABTS (7mM) con persulfato de potasio (2.45 mM) a temperatura ambiente (25 °C) entre 12 a 16 horas en ausencia de luz, dicha solución se diluyó con tampón de fosfatos a pH 7.4 para obtener un valor de absorbancia de 0.70 (±0.1) a 734 nm. Por otro lado, en una placa de 96 pocillos se colocó 20 µL de la muestra o estándar y 180 µL de la solución de ABTS y se dejó reaccionar durante 5 min, para finalmente medir la absorbancia a 734 nm utilizando un lector de microplacas (Multiskan FC modelo IVD, Vanta, Finlandia). Los resultados obtenidos se expresaron como % de inhibición del radical.

Determinación de actividad antioxidante por DPPH

El estudio evaluó la capacidad de las muestras para eliminar los radicales 2,2-difenil-1-picril-hidrazil-hidrato DPPH utilizando un método modificado para microplacas de 96 pocillos de acuerdo con el protocolo descrito por Brand-Williams (1995) con algunas modificaciones. Se preparó una curva estándar de Trolox a partir de 2 mg en 10 mL de metanol al 80%. Se disolvió 1 mg del radical DPPH en 50 mL de metanol al 80%. En la placa de 96 pocillos, se agregaron 150 µL de la muestra en diferentes concentraciones y 150 µL de DPPH. Después de una incubación de 30 minutos a temperatura ambiente, se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 517 nm en un espectrofotómetro de placa (Multiskan GO Thermo Scientific, Vantaa, Finlandia). Los resultados obtenidos se expresaron como % de inhibición del radical.

RESULTADOS

Contenido de antocianinas monoméricas totales (CAM)

La evaluación del contenido de antocianinas monoméricas en los diferentes extractos y digeridos se expresó en microgramos de cianidina-3-glucósido por gramo (mg C3GE/g^{-1}). Como se muestra en la Tabla 1, los extractos crudo y cocido al vapor presentaron el mayor contenido de antocianinas con valores de 4.84 y 3.12 mg C3G g^{-1} respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados por Benvenuti et al. (2016) en extractos hidrometanólicos de flores rojas crudas y comestibles como *Fuchsia hybrida*, *Antirrhinum majus* y *Begonia semperflorens* donde obtuvieron un total de antocianinas monoméricas de 7.58± 0.6, 7.37± 0.5 y 5.09± 0.4 mg C3G g^{-1} respectivamente, el contenido de antocianinas monoméricas puede variar según el método de extracción, el solvente utilizado, la temperatura y tiempo de extracción (Montoya-Viera, 2022), así mismo se ha reportado

en distintas flores comestibles que disminuyen la concentración de polifenoles y antocianinas después de la cocción en comparación con el tejido fresco (Blessington et al., 2010).

Por otro lado, se puede observar que, tras la digestión gastrointestinal simulada, el contenido de antocianinas monoméricas disminuyó de forma drástica con valores de 0.12 ± 0.01, 0.08 ± 0.02 y 0.07 ± 0.02 mg C3G g-1 en la fase oral, gástrica e intestinal respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados por Serena-Romero (2019) quien observó que en flores cocidas al vapor de *Erythrina americana*, el contenido de antocianinas disminuyó de 1.65 ± 0.06 mg C3G·g^{-1} en la fase oral a 0.63 ± 0.09 mg C3G·g^{-1} en la fase gástrica, siendo indetectable en la fase intestinal. La marcada disminución puede atribuirse a la baja estabilidad de las antocianinas frente a factores como la temperatura, el pH ácido o neutro y la presencia de oxígeno, que inducen su degradación durante el proceso digestivo simulado (Barani et al., 2022).

Muestras	CAM (mg C3G g^{-1})
Extracto crudo	4.84 ± .48a
Extracto cocido	3.12 ± .28^{b}
Digerido oral	0.12 ± .01^{c}
Digerido gástrico	0.08 ± .02^{c}
Digerido intestinal	0.07 ± .02^{c}

Tabla 1. Contenido de antocianinas monoméricas totales (CAM), expresado como media ± desviación estándar, en extractos hidroetanólicos de flores de frijol ayocote crudas, cocidas al vapor (3 min) y durante las fases oral, gástrica e intestinal de la digestión gastrointestinal in vitro. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Cuantificación de compuestos fenólicos totales (CFT)

Se determinó el contenido fenólico total de los extractos hidroetanólicos (crudos y cocidos al vapor) de las flores de *Phaseolus coccineus* L., así como de las muestras de las fases de digestión in vitro (oral, gástrica e intestinal), y se expresó en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (mg GAE·g^{-1}). Como se muestra en la Figura 4, el extracto crudo exhibió el CFT más alto (11.24 ± 1.62 mg de GAE·g^{-1}), seguido por el extracto cocido al vapor (8.18 ± 0.13 mg de GAE·g^{-1}). Estos valores son consistentes con los reportados por Pinedo-Espinoza et al. (2020), quienes evaluaron extractos hidroetanólicos de flores de *Erythrina americana* y encontraron un CFT de 7.80 ± 0.11 mg GAE·g^{-1} de peso seco.

Curiosamente, la digestión gastrointestinal simulada in vitro condujo a un aumento notable en los valores de TPC, particularmente en la fase intestinal (24.16 ± 1.89 mg GAE·g^{-1}), seguida de las fases gástrica (21,09 ± 3.12 mg GAE·g^{-1}) y oral (16.62 ± 10,9 mg GAE·g^{-1}). Patrones similares han sido descritos en estudios previos sobre flores comestibles. Janarny (2022) evaluó el efecto de la digestión simulada sobre el contenido fenólico total y la actividad biológica de flores pertenecientes a la familia Fabaceae. En particular, para *Bauhinia racemose*, se observó un incremento significativo del TPC durante la digestión, siendo la fase gástrica la que presentó los niveles más elevados, seguida de la fase intestinal. Esta tendencia ascendente sugiere una liberación o transformación progresiva de compuestos fenólicos durante la digestión.

Este aumento en la disponibilidad fenólica puede atribuirse a las condiciones fisiológicas durante la digestión gastrointestinal, particularmente las variaciones del pH y la actividad enzimática, que promueven la hidrólisis de los complejos fenólico-macromoléculas. Estas interacciones a menudo

involucran enlaces covalentes o no covalentes con proteínas, fibra dietética y residuos de azúcar, que facilita la solubilización y liberación de compuestos fenólicos unidos (Gullón et al., 2015).

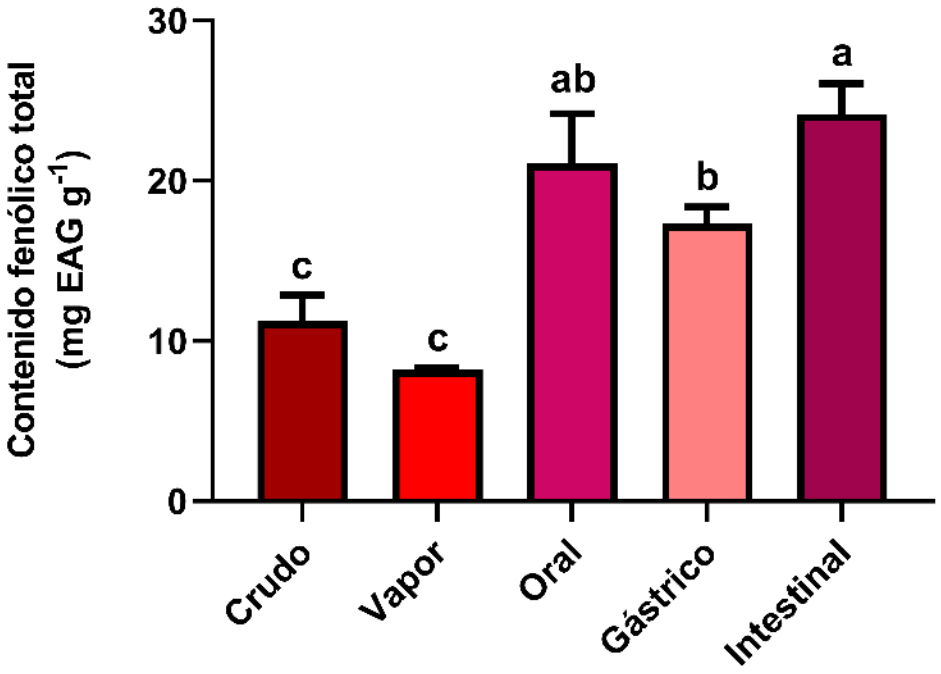


Figura 4. Contenido de compuestos fenólicos totales (media ± desviación estándar) en los extractos hidroetanólicos de flores de frijol ayocote crudas, cocidas al vapor (3 min) y durante las fases oral, gástrica e intestinal de la digestión gastrointestinal in vitro. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Determinación de la actividad antioxidante por ABTS y DPPH

Como se observa en la Figura 5 se evaluó la capacidad antioxidante por los métodos químicos ABTS y DPPH en los extractos hidroetanólicos y las fases oral, gástrica e intestinal de la digestión simulada representadas en % de inhibición (Figura 5a y 5c) e IC_{50} (Figura 5b y 5d).

En el ensayo de ABTS el extracto cocido al vapor por 3 minutos y el crudo mostraron la mayor capacidad antioxidante, con valores de IC_{50} de 120 ± 14.20 μg·mL^{-1} y 185,7 ± 44.36 μg·mL^{-1}, respectivamente. En cambio, el ensayo DPPH mostró una menor actividad en estas mismas muestras, con valores de IC_{50} de 413.5 ± 25.46 μg·mL^{-1} para el extracto crudo y de 652.2 ± 33.63 μg·mL^{-1} para el extracto cocido. Sin embargo, cuando se compararon con los valores reportados para otros extractos de flores comestibles, como *Tropaeolum majus*, que presentó valores de IC_{50} de 241.66 ± 3.71 μg·mL^{-1} (ABTS) y 715.59 ± 2.53 μg·mL^{-1} (DPPH), los extractos de flores de frijol ayocote mostraron una capacidad superior de eliminación de radicales ABTS (Hegde et al., 2023).

En cuanto a las muestras digeridas, la fase intestinal mostró el menor valor de IC_{50} para ABTS (179.3 ± 4.34 μg·mL^{-1}), lo que indica una mayor actividad antioxidante en comparación con las fases oral y gástrica. En el ensayo DPPH, la digestión gástrica produjo el extracto más activo (IC_{50} = 165.6 ± 18.39 μg·mL^{-1}), seguido de las fases oral (205.9 ± 10.99 μg·mL^{-1}) e intestinal (267.3 ± 18.68 μg·mL^{-1}), aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre ellos.

Estos resultados son consistentes con el aumento del contenido fenólico total observado después de la digestión (ver Figura 3), lo que sugiere que los compuestos fenólicos liberados o transformados durante el proceso gastrointestinal contribuyen a la mayor actividad antioxidante. El mecanismo responsable de esta actividad consiste en la donación de átomos de hidrógeno desde grupos hidroxilo o catecol presentes en los polifenoles, lo que permite neutralizar eficazmente los radicales libres (Hegde et al., 2023).

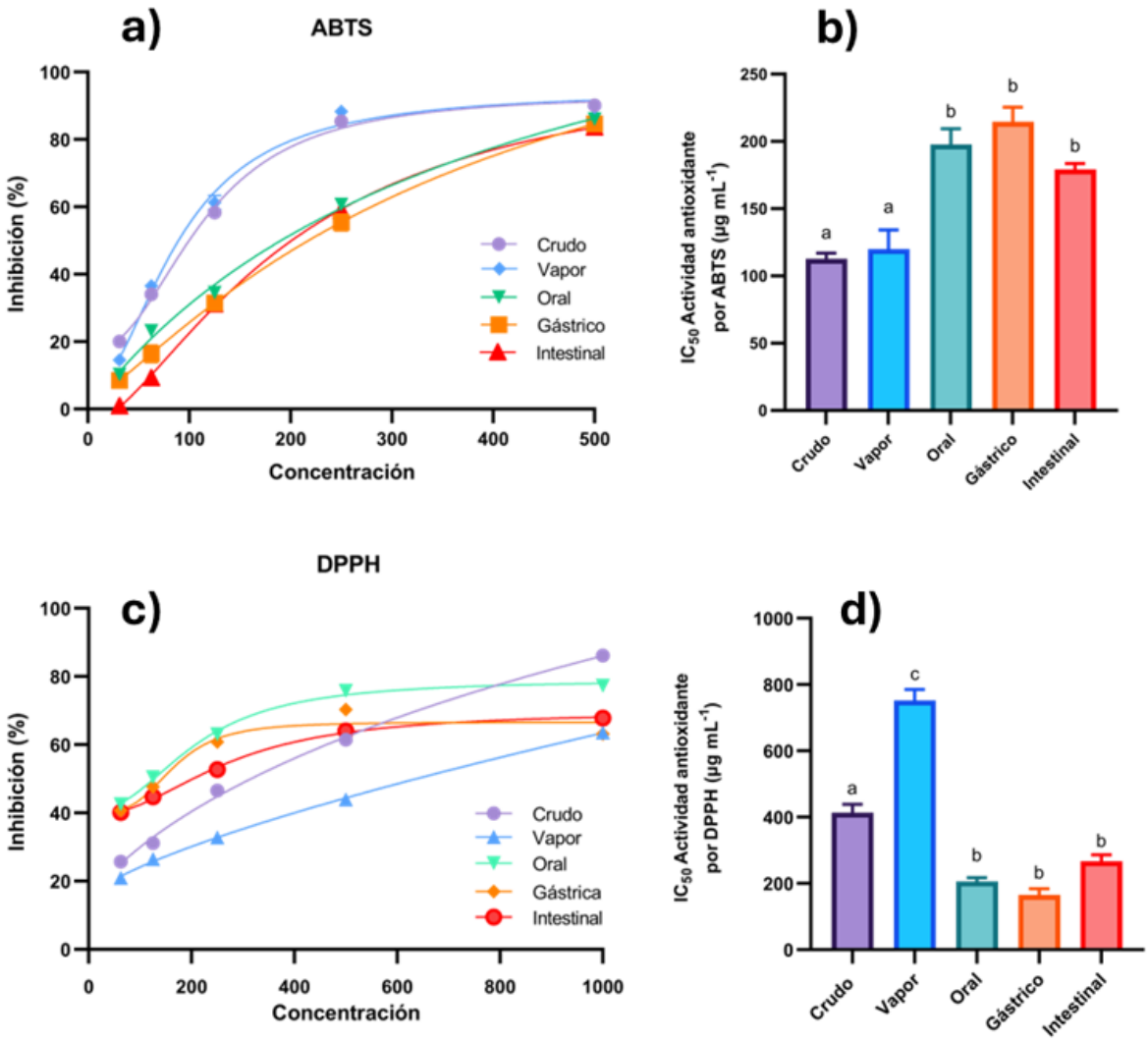


Figura 5. Capacidad antioxidante de los extractos de flores de frijol ayocote silvestre crudas, cocidas al vapor (3 min) y durante las fases oral, gástrica e intestinal de la digestión gastrointestinal in vitro, (a) cinéticas de inhibición del radical ABTS a distintas concentraciones, (b) valores de IC_{50} de inhibición del radical ABTS, (c) cinéticas de inhibición del radical DPPH, (d) valores de IC_{50} de inhibición del radical DPPH. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar (n = 4). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

CONCLUSIONES

El contenido de antocianinas monoméricas se redujo significativamente debido a la sensibilidad térmica de estos pigmentos. La cocción al vapor durante 3 minutos condujo a una reducción de aproximadamente el 35 %, mientras que la digestión gastrointestinal simulada causó una degradación de más del 90 %, atribuida principalmente a las variaciones del pH y la actividad enzimática. Por otro lado, el contenido fenólico total aumentó notablemente después de la digestión, tras la fase intestinal mostró los valores más altos, lo que sugiere que las condiciones de la digestión y la acción de las enzimas digestivas favorecen a la liberación de estos compuestos de la matriz vegetal, favoreciendo así a una mayor bioactividad de actividad antioxidante. Con respecto a los ensayos de antioxidantes, los resultados de ABTS indicaron una mayor actividad tanto en extractos crudos como cocidos al vapor, mientras que los ensayos de DPPH revelaron que las muestras digeridas exhibieron valores de IC_{50} más bajos, lo que indica una mayor capacidad de eliminación de radicales después de la digestión, lo que corrobora la mayor liberación de compuestos fenólicos activos. En general, las flores de frijol ayocote silvestre (*Phaseolus coccineus* L.) conservan e incluso mejoran su potencial antioxidante a lo largo de la digestión simulada. Por lo tanto, su inclusión en la dieta podría contribuir a la prevención o el tratamiento de enfermedades crónicas asociadas con el estrés oxidativo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AOAC. (2005). *Official methods of analysis* (17th ed.). Association of Official Analytical Chemists.
2. Barani, H., Pateiro, M., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. (2022). Preservation of color and nutrients in anthocyanin-rich edible flowers: Progress of new extraction and processing techniques. *Journal of Food Processing and Preservation, 46*(7), e16474. https://doi.org/10.1111/jfpp.16474
3. Benvenuti, S., Bortolotti, E., & Maggini, R. (2016). Antioxidant power, anthocyanin content and organoleptic performance of edible flowers. *Scientia Horticulturae, 199*, 170–177. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.052
4. Blessington, T., Nzaramba, M. N., Scheuring, D. C., Hale, A. L., Reddivari, L., & Miller, J. C. (2010). Cooking methods and storage treatments of potato: Effects on carotenoids, antioxidant activity, and phenolics. *American Journal of Potato Research, 87*(6), 479–491. https://www.academia.edu/24219079
5. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology, 28*(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5
6. Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., … Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols, 14*(4), 991–1014. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1
7. Butkhup, L., & Samappito, S. (2008). Análisis de antocianinas, flavonoides y ácidos fenólicos en bayas de bignay tropicales. *Revista Internacional de Ciencias de la Fruta, 8*(1–2), 15–34. http://dx.doi.org/10.1080/15538360802365913
8. Coyago-Cruz, E., Alarcón, A., Guachamín, A., Méndez, G., Osorio, E., Heredia-Moya, J., Zuñiga-Miranda, J., Beltrán-Sinchiguano, E., & Vera, E. (2024). Functional, antioxidant,

antibacterial, and antifungal activity of edible flowers. *Antioxidants, 13*(11), 1297. https://doi.org/10.3390/antiox13111297

9. Cruz-Huerta, E. (2025). *Created in BioRender* [Ilustración]. BioRender. https://biorender.com/pdbqb4z
10. de Morais, A. S., Sant'Ana, A. S., Dantas, A. M., Silva, B. S., Lima, M. S., Borges, G. C., & Magnani, M. (2020). Antioxidant activity and bioaccessibility of phenolic compounds in white, red, blue, purple, yellow and orange edible flowers through a simulated intestinal barrier. *Food Research International, 131*, 109046. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109046
11. Díaz-Hung, M. L., & González Fraguela, M. E. (2013). El estrés oxidativo en las enfermedades neurológicas: ¿Causa o consecuencia? *Neurología, 29*(8), 451–452. https://doi.org/10.1016/j.nrl.2013.06.022
12. Elejalde-Guerra, J. I. (2001). Estrés oxidativo, enfermedades y tratamientos antioxidantes [Oxidative stress, diseases and antioxidant treatment]. *Anales de Medicina Interna (Madrid, Spain : 1984), 18*(6), 326–335.
13. Espinosa-Leal, C., Treviño-Neávez, J. F., Garza-Padrón, R. A., Verde-Star, M. J., Rivas-Morales, C., & Morales-Rubio, M. E. (2015). Contenido de fenoles totales y actividad anti-radical de extractos metanólicos de la planta silvestre y cultivada *in vitro* de *Leucophyllum frutescens*. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, 46*(3), 52–56.
14. Gullón, B., Pintado, M. E., Barber, X., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. A., & Viuda-Martos, M. (2015). Digestión gastrointestinal *in vitro* de harina de cáscara de granada (*Punica granatum*) obtenida a partir de coproductos: Cambios en el potencial antioxidante y la estabilidad de los compuestos bioactivos. *Journal of Functional Foods, 19*, 617–628. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.09.056
15. Hegde, A. S., Gupta, S., Kumari, P., Joshi, R., & Srivatsan, V. (2023). Wild edible flowers of Western Himalayas: Nutritional characterization, UHPLC-QTOF-IMS-based phytochemical profiling, antioxidant properties, and *in vitro* bioaccessibility of polyphenols. *ACS Omega, 8*(43), 40212–40228. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03861
16. Heike-Vibrans, L., & Mondragón-Pichardo, J. (2009). *Phaseolus coccineus L.* En *Malezas de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/phaseoluscoccineus/fichas/ficha.htm
17. Janarny, G., Ranaweera, K. K. D. S., & Gunathilake, K. D. P. P. (2022). Recuperación digestiva de polifenoles, actividad antioxidante y actividad antiinflamatoria de flores comestibles seleccionadas de la familia Fabaceae. *Journal of Food Biochemistry, 46*(2), e14052. https://doi.org/10.1111/jfbc.14052
18. Kähkönen, M. P., Hopia, A. I., Vuorela, H. J., Rauha, J. P., Pihlaja, K., Kujala, T. S., & Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47*(10), 3954–3962. https://doi.org/10.1021/jf990146l
19. Meneses, C. J. M., Mazon, I. L. F., & Pérez, A. A. F. (2024). Uso potencial de flores endémicas mexicanas como fuente de compuestos bioactivos. *Digital Ciencia@UAQRO, 17*(1), 121–129.
20. Molina, R., & Rodríguez, C. (2012). Definición, clasificación y diagnóstico de la diabetes mellitus. *Revista Venezolana de Endocrinología y Metabolismo, 10*, 7–12. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1690-31102012000400003
21. Montoya Viera, S. W. (2022). *Evaluación del contenido de antocianinas totales y actividad antioxidante en pétalos de Rosa spp. variedad "Freedom" en diferentes etapas de floración*

y condiciones de extracción [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5236

22. Mulík, S., & Ozuna, C. (2020). Mexican edible flowers: Cultural background, traditional culinary uses, and potential health benefits. *International Journal of Gastronomy and Food Science, 21*, 100235. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100235
23. Organización Mundial de la Salud. (2019). *Enfermedades no transmisibles*. https://www.who.int/es/health-topics/noncommunicable-diseases#tab=tab_1
24. Organización Mundial de la Salud. (2024). *Enfermedades no transmisibles*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases
25. Organización Panamericana de la Salud. (2023). *Enfermedades no transmisibles*. https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-no-transmisibles
26. Ortega-Hernández, E., Acevedo-Pacheco, L., Jacobo-Velázquez, D. A., & Antunes-Ricardo, M. (2023). Bioaccessibility and potential biological activities of lutein, glucosinolates, and phenolic compounds accumulated in kale sprouts treated with selenium, sulfur, and methyl jasmonate. *ACS Food Science & Technology, 3*(3), 404–413. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00285
27. Pinedo-Espinoza, J. M., Gutiérrez-Tlahque, J., Santiago-Saenz, Y. O., Aguirre-Mancilla, C. L., Reyes-Fuentes, M., & López-Palestina, C. U. (2020). Nutritional composition, bioactive compounds and antioxidant activity of wild edible flowers consumed in semiarid regions of Mexico. *Plant Foods for Human Nutrition, 75*(3), 413–419. https://doi.org/10.1007/s11130-020-00822-2
28. Pires, E. O., Jr., Di Gioia, F., Rouphael, Y., Ferreira, I. C. F. R., Caleja, C., Barros, L., & Petropoulos, S. A. (2021). The compositional aspects of edible flowers as an emerging horticultural product. *Molecules, 26*(22), 6940. https://doi.org/10.3390/molecules26226940
29. Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Actividad antioxidante aplicando un ensayo mejorado de decoloración de cationes radicales ABTS. *Free Radical Biology and Medicine, 26*(9–10), 1231–1237.
30. San-Miguel, A., & Martín-Gil, F. J. (2009). Importancia de las especies reactivas al oxígeno (radicales libres) y los antioxidantes en clínica. *Gaceta Médica de Bilbao, 106*(3), 106–113. https://doi.org/10.1016/s0304-4858(09)74661-x
31. Serena-Romero. G. (2019). *Bioaccesibilidad de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en flores de gasparito (Erythrina americana Miller), calabaza (Cucurbita pepo L.) e izote (Yucca elephantipes Regel)* [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas].
32. Takahashi, J. A., Rezende, F. A. G. G., Moura, M. A. F., Dominguete, L. C. B., & Sande, D. (2020). Edible flowers: Bioactive profile and its potential to be used in food development. *Food Research International, 129*, 108868. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108868

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ANOMALÍAS "EL NIÑO", "LA NIÑA" Y "AÑOS NORMALES" EN LA PRODUCCIÓN DE MIEL EN LA ZONA ORIENTE DEL ESTADO DE TLAXCALA

María Fernanda Sosa Rendón[1], Maricela Hernández Vázquez[1], Silvia Herrera Cortés[1,] Minerva Flores Morales[1]

[1]Universidad Autónoma de Tlaxcala, Licenciatura en ciencias ambientales.
maryfersosa384@gmail.com

RESUMEN

La apicultura es una actividad de importancia socioeconómica y ecológica en el estado de Tlaxcala, debido a su contribución tanto en la polinización de cultivos como en el desarrollo de la economía local. Sin embargo, es importante señalar que esta actividad depende principalmente del clima y los recursos naturales. Las anomalías de El Niño y La Niña inciden en la variabilidad del clima de una región, modificando la estructura y función de un ecosistema, que traen consigo eventos climáticos extremos como sequías prolongadas, lluvias torrenciales e inestabilidad térmica, provocando bajos rendimientos en los cultivos ya que interrumpen el desarrollo de diversas fases vegetativas, la flora apícola también se ve afectada, y las abejas comienzan a tener problemas para encontrar fuentes de alimento con abundante néctar, disminuyendo su capacidad para forrajear. En esta investigación se evaluó el riesgo de la producción de miel en seis municipios de la zona oriente del estado (Atltzayanca, Cuapiaxtla, Huamantla, Tzompantepec, Xaloztoc, Zitlaltepec) ante las anomalías de El Niño, La Niña y Años Normales. Para ello, se obtuvieron datos de la producción de miel a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) del periodo 2006 a 2023, y se identificaron los años de El Niño, La Niña y Años Normales, calculando el promedio de las anomalías. Para evaluar el riesgo se aplicó la metodología de probabilidad condicional. Los resultados indican que los seis municipios en estudio son vulnerables al evento de El Niño con una probabilidad del 50% de obtener producción media y baja. Por otra parte, Atltzayanca, Huamantla y Xaloztoc son vulnerables al evento de La Niña, en promedio hay un 20% de probabilidad de obtener producción media y 62% de probabilidad de obtener producción baja, ~~pero~~ a Cuapiaxtla, Tzompantepec y Zitlaltepec este evento beneficia la producción de miel con un promedio del 64% de obtener producción media. En general, a los apicultores de la zona oriente del estado les conviene la ausencia de estos dos eventos y que los años sean normales, pues aseguran el 63% de probabilidad de obtener producción media, en el caso de Tzompantepec hasta un 90% de probabilidad y Zitlaltepec un 72%. Finalmente, las anomalías de El Niño y La Niña alteran significativamente la producción de miel, evidenciando la vulnerabilidad de esta actividad frente a estos fenómenos climáticos. Es por esto que se requiere mejorar las estrategias de adaptación y manejo en la apicultura para mitigar los efectos adversos del clima y garantizar la sostenibilidad de esta actividad.

INTRODUCCIÓN

La apicultura en México es una actividad de importancia socioeconómica y ecológica que depende del clima y los sistemas naturales, mismos que son vulnerables a eventos climáticos extremos como las sequías y heladas, poniendo en riesgo la producción de miel (Pérez-Vásquez, 2019).

Gallardo-López *et al.*, (2016), señala la necesidad de realizar proyecciones climáticas y su posible impacto tanto en la flora melífera como en la población apícola. El IPCC en 2007 advierte que las proyecciones de escenarios futuros muestran un cambio en los patrones de lluvia, ocasionando que las abejas disminuyan la actividad en el pecoreo de néctar y polen, por agua. Catellanos-Ponteciano, *et al*., (2016) encontró que ciertas especies de plantas importantes para la polinización tienen una respuesta de movilidad espacio temporal hacia latitudes más elevadas provocando un cambio en la dinámica poblacional de las colonias de abejas, de igual forma hay un riesgo de rentabilidad, desembocando por consiguiente en un posible abandono de la actividad.

En materia de anomalías y vulnerabilidad en la producción de miel, no se han reportado investigaciones sobre el tema, consiguiendo que esta investigación contribuya a la implementación de trabajos sobre la apicultura y su vulnerabilidad ante las anomalías. En esta investigación se evalúa el riesgo por anomalías El Niño, La Niña y Años Normales para la producción de miel en la zona oriente del estado de Tlaxcala.

La importancia de la apicultura

La apicultura es una actividad agropecuaria que se dedica a la crianza de abejas con el fin de obtener productos, como la miel, la cera, la jalea real, entre otros (Pavez, 2017). De acuerdo con la organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) esta actividad ayuda a fomentar la creación de sistemas de vida sostenibles. De igual manera las abejas se desempeñan como uno de los mayores polinizadores ayudando a la producción de los cultivos entomófilos e incrementando los rendimientos de las cosechas y calidad de frutos y semillas (Verde, *et al.,* 2019) Para desarrollar esta actividad se requiere de condiciones óptimas, en las que se integran los factores ambientales, la disponibilidad de recursos, el clima, la biodiversidad y las interacciones con otros organismos (Rodrigo y Medellín- Pi, 2012).

La apicultura ha tenido un desarrollo por productores pequeños y medianos teniendo participación en el mercado internacional. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2022 México produjo 64.32 mil toneladas de miel y en 2023 58.33 mil toneladas, aunque la producción de miel varia año con año, México se ha colocado en los primeros diez lugares a nivel mundial. En promedio, en el Estado de Tlaxcala se producen 891 toneladas de miel (SIAP, 2022), contribuyendo al 7% del Producto Interno Bruto (PIB) y con un registro de 350 apicultores concentrados en más de 16 municipios, entre los que destacan Huamantla, Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos, Cuapiaxtla, Ixtenco, Tzompantepec, Xaloztoc y Atltzayanca (Lara, 2023).

Apis melífera

La Apis mellifera es una especie autóctona de África, Europa y Oriente Medio, en América es una especie introducida. Es una especie que se organiza en colonias, con una estructura jerárquica. Dentro de estas colonias, las abejas están divididas en castas (Figura 2) cada una con funciones diferentes:

- La reina: Se encarga de la oviposición, puede poner hasta 2,000 huevos por día en condiciones óptimas. Durante su desarrollo la larva se alimenta de jalea real, estimulando su crecimiento y desarrollo de órganos reproductivos (Hernández y Gamarra, s.f). La reina produce feromonas que ayudan a regular las actividades de la colonia y mantener el orden social (Arévalo, 2021). Vive en un promedio de 1 a 4 años (SADER, 2024).
- Los zánganos: Los huevos no fecundados (sin contribución paterna genética) son los machos de la colonia, su único propósito es aparearse, éstos mueren inmediatamente después de copular (Arévalo, 2021).
- Las obreras: Responsables de todas las tareas de la colonia, son abejas hembra, pero a diferencia de la reina sus órganos reproductores están subdesarrollados. Sus funciones son la limpieza de la colmena (limpiadoras), cuidan de las larvas (nodrizas), producen la cera, ayudan a regular la temperatura y humedad de la colmena (cereras). Las obreras viven entre 4 y 6 semanas (Hernández y Gamarra, s.f.).

Figura 1. a) obrera, b) reina y c) zángano (macho).
Fuente:https://www.ecocolmena.org/ciclo-de-vida-de-las-abejas/

Condiciones climáticas

Las abejas son ectodérmicas. Para el desarrollo de las crías y la elaboración de la miel se requiere una temperatura dentro de la colmena entre los 34-35°C, Si la temperatura exterior es muy baja, las abejas forman un racimo invernal, si es demasiado alta, ventilan activamente la colmena. Los niveles de humedad afectan la maduración de la miel, una cantidad muy alta dificulta el proceso de evaporación del néctar provocando problemas en la conservación de la miel (Delgado, 1984, citado en Catellanos-Ponteciano, et al., 2016).

Los eventos climáticos ejercen un impacto directo sobre la producción de miel, al modificar la disponibilidad de néctar, alterar el comportamiento forrajeo de las abejas y comprometer la salud de las colonias. Cambios abruptos en variables como la temperatura, la precipitación y la humedad pueden provocar desequilibrios fenológicos en la flora melífera (Dini *et al*., 2022). Las estaciones marcan los ritmos de actividad de las abejas. En primavera y verano cuando las temperaturas son cálidas hay abundancia de flores, permitiendo que las abejas estén más activas y acumulen alimentos. En invierno la actividad disminuye, en esta estación las abejas dependen de las reservas almacenadas de miel (Fernández, 2022).

Anomalías El Niño y La Niña

Los eventos climáticos conocidos como El Niño Oscilación del Sur (ENSO) generan variaciones anómalas en las condiciones oceánicas y atmosféricas del océano Pacifico ecuatorial, provocando alteraciones significativas en los patrones climáticos a nivel mundial. Éste tiene tres fases: Cálida (El Niño), Fría (La Niña) y Neutral (Servicio Meteorológico Nacional, 2023) (Figura 2). Estas anomalías influyen directamente sobre los ecosistemas terrestres y productivos, como es el caso de la apicultura y agricultura

.

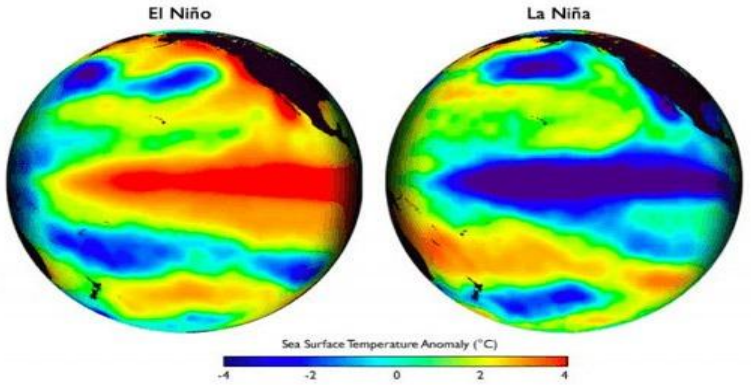


Figura 2. Evento de El Niño y La Niña

Fuente: https://ecoexploratorio.org/vida-en-el-mar/mar-y-oceano/el-nino-la-nina/

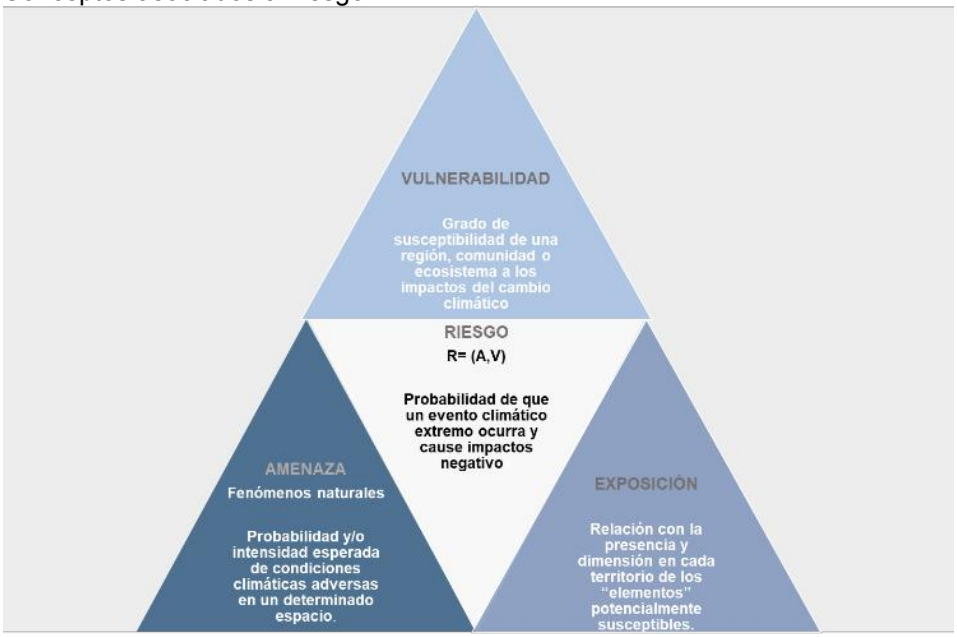
El Niño se caracteriza por un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del océano Pacífico ecuatorial, lo que provoca sequías intensas en algunas regiones y lluvias extremas en otras zonas (Pabón y Montealegre, 2017; NOAA,2023). En las zonas donde prevalece la sequía, las plantas melíferas reducen o suspenden su floración, limitando la producción de néctar (Dini *et al*., 2022)
Por otro lado, en regiones como lluvias excesivas, las flores pueden verse dañadas y el néctar al diluirse por la humedad, pierde calidad. Esta condición afecta el rendimiento y la salud de las colmenas (Espinosa,2021).

La Niña se manifiesta por un enfriamiento anormal de las aguas Pacífico ecuatorial, acompañado del fortalecimiento de los vientos alisios, este suele provocar desplazamientos anómalos en las precipitaciones mientras algunas regiones enfrentan lluvias, otras sufren déficit hídrico (Pabón y Montealegre, 2017; FAO, 2022). La Niña tiende a alterar los ciclos fenológicos de la vegetación y desfasa la floración respecto a la actividad de las abejas, lo cual compromete la polinización y la recolección de néctar (IPCC,2023).

Riesgo y vulnerabilidad
El riesgo climático mide la probabilidad de que un evento climático extremo ocurra y cause impactos negativos, en este se presentan tres términos: a) amenaza climática, hace referencia a la frecuencia y magnitud de los eventos climáticos peligrosos, como ciclones, lluvias torrenciales o sequías prolongadas; b) exposición, se refiere a los elementos o sistemas que están ubicados en zonas susceptibles de verse afectados por los eventos climáticos; c) vulnerabilidad, define que tan susceptibles son los sistemas expuestos para verse afectados por el evento climático, esto depende de factores económicos, sociales, tecnológicos y de infraestructura (CR2, 2018) .

La vulnerabilidad climática se refiere al grado de susceptibilidad de una región, comunidad o ecosistema a los impactos del cambio climático, esta depende de la sensibilidad que es la medida en que un sistema es afectado por eventos climáticos, de igual forma de la capacidad de adaptación, se muestra como la habilidad de un ecosistema para ajustarse y responder a los cambios. También depende de las condiciones preexistentes, factores como pobreza, desigualdad social, falta de acceso a servicios básicos y la degradación del ambiente (INECC, 2016) (Figura 3).

Figura 3. Conceptos asociados al riesgo



Fuente: Elaboración propia con datos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2018).

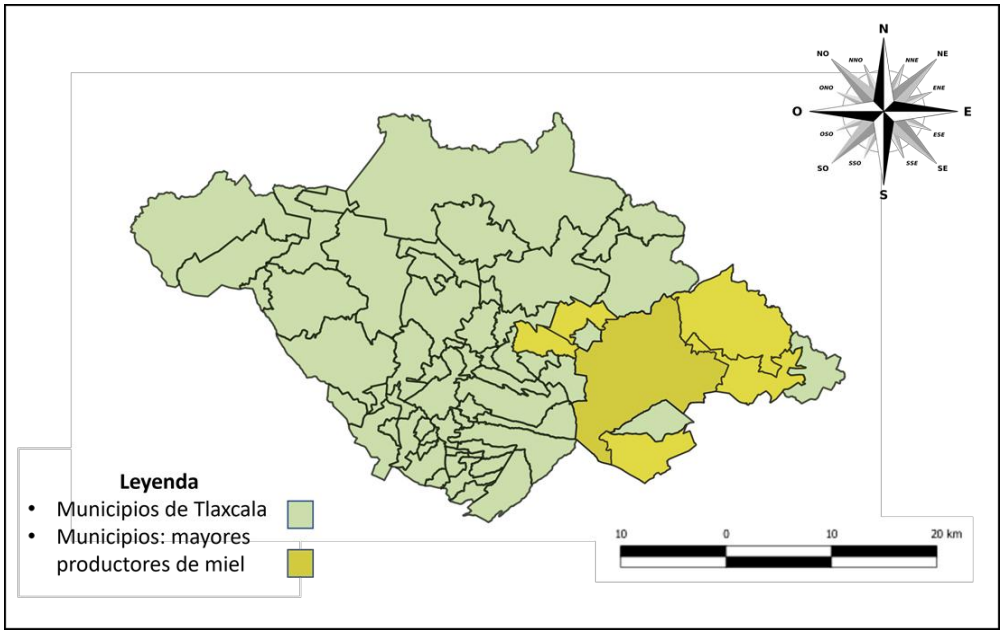
PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudio

El Estado de Tlaxcala se localiza en la parte centro-oriental del país, entre los 97°37'07" y los 98°42' 51" de longitud oeste, y los 19°05'43" y los 19°44' 07" de latitud norte. La zona oriente como área de estudio se encuentra ubicada a los 19°12´de latitud norte y 98° 05´ de longitud oeste, con una altitud promedio de 2504 metros sobre el nivel del mar. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w), el promedio de la temperatura mínima anual es de 6.3°C y de la temperatura máxima es de 22.3°C. (INEGI, 2022).

Una de las principales actividades económicas del Estado es la apicultura, ocupa el tercer lugar como productor de miel a nivel nacional, aportando casi el 7% del Producto Interno Bruto (PIB) Tlaxcala. Se produce miel en más de 50 municipios, de los cuales destacan Huamantla, Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos, Xaloztoc, Atltzayanca, Tzompantepec y Cuapiaxtla ubicados en la zona oriente del estado (Figura 4) (SIACON, 2017).

Figura 4. Mapa de los Municipios productores de la zona oriente de Tlaxcala



Elaboración propia con datos de (SIACON, 2023)

Base de datos

Para la obtención de datos de la producción de miel fue a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en la cual se trabajó del periodo 2006 al 2023.

A través de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) del periodo 2006 al 2023 se obtuvieron los datos de las anomalías, para identificar los años de El Niño, La Niña y Los Años Normales se calculó el promedio de las anomalías, si el promedio de la anomalía es mayor a 0.5 es año de El Niño, si es menor a 0.5 es año de La Niña y si el promedio se encuentra entre estos dos rangos se consideran Años Normales.

Evaluación de riesgo

Para realizar un análisis de riesgo se deben seguir tres pasos:

a) estimar la amenaza

b) evaluar la vulnerabilidad y,

c) llevar a cabo la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores.

Para evaluar el riesgo climático se hará uso de información climática y de la producción de miel. Para determinar el riesgo climático se estima cada uno de los componentes; la amenaza y la vulnerabilidad. Para este análisis es necesario:

1. Generar diagnósticos climáticos. Consiste en evaluar las condiciones históricas del clima de los municipios productores de miel del estado. Con base en estos datos, es posible establecer en qué medida las variaciones del clima constituyen una amenaza para la producción.
2. Estimar la vulnerabilidad en forma cualitativa, para ello se requieren datos de la producción de miel, y se procede a la siguiente deducción:

VULNERABILIDAD (V) = IMPACTOS (I) – ADAPTACIÓN (A)

Donde:

(A) = estrategias y acciones para enfrentar el riesgo.

(I) = efectos en la producción de miel por variabilidad climática.

Cuando no existen medidas de adaptación la vulnerabilidad se resume en V = I. Una forma de evaluar dicho impacto es a partir de los valores de producción (t). Se sabe que existen otros factores físicos y sociales que pueden determinar los valores del rendimiento, en este estudio se supone que algún impacto asociado a la variabilidad climática es la principal causa de que se presenten baja o alta producción de miel.

El riesgo se estima en términos de probabilidad condicional (Wilks, 1995), que es la probabilidad de que un evento E1 ocurra cuando sabemos que un evento E2 ocurrió u ocurrirá y lo denotamos por Pr(E1|E2). Formalmente la probabilidad condicional es definida en términos de la intersección del evento de interés (E1) y el evento condicional (E2).

$$\boldsymbol{Pr(E_1|E_2) = \frac{P_r(E_1 \cap E_2)}{P_r(E_2)}}$$

Y es planteado con base en una matriz que describe la relación impacto/amenaza. Los renglones representan las amenazas dadas por la variabilidad climática y las columnas los posibles impactos evaluados en los valores de producción (t) (Cuadro 2).

Se considera que dada la situación de que se presente un peligro o condición de amenaza [A1], los impactos que pueden corresponder a la vulnerabilidad son obtener producción alta, media y baja[B1], [B2] o [B3]). Por lo tanto, los elementos R (A, B) representan los valores de la probabilidad de riesgo de obtener producción baja, media o alta cuando se presenta una condiciona climática extrema (Bojorquez-Serrano, *et. al.*, 2018)

Cuadro 1. Matriz de riesgo

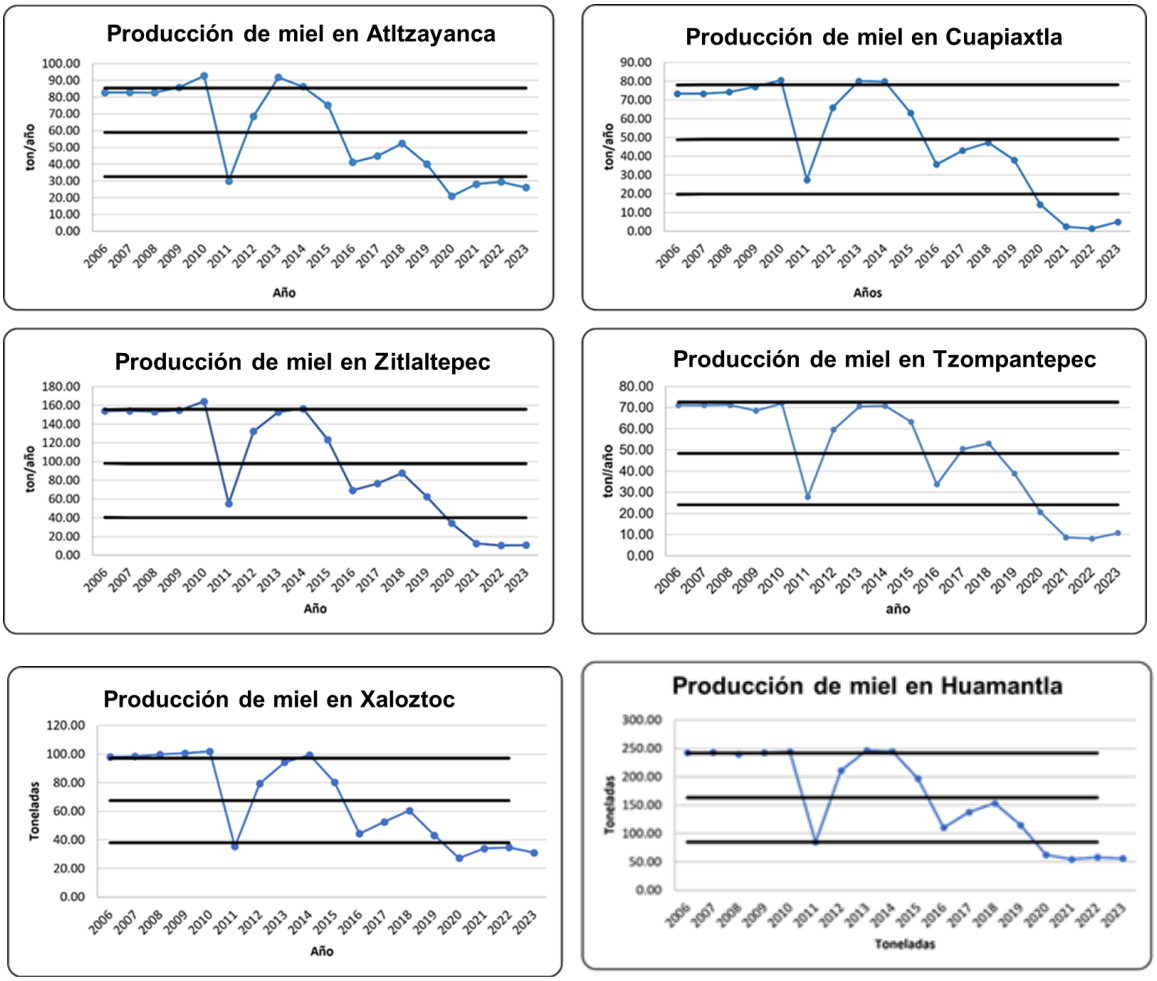
Amenaza/Impacto	B1	B2	B3
A1	R(A1,B1)	R(A1,B2)	R(A1,B3)
A2	R(A2,B1)	R(A2,B2)	R(A2,B3)
A3	R(A3,B1)	R(A3,B2)	R(A3,B3)

RESULTADOS

Producción de miel en la zona oriente

De acuerdo con datos del SIAP el promedio anual de la producción de miel es de 84.2 t. El municipio con mayor producción es Huamantla, con un promedio de 163.36 t/año, mientras que el municipio con la menor producción es Tzompantepec con un promedio de 48.31 t/año (Figura 5).

Figura 5. Producción anual de los municipios de la zona oriente

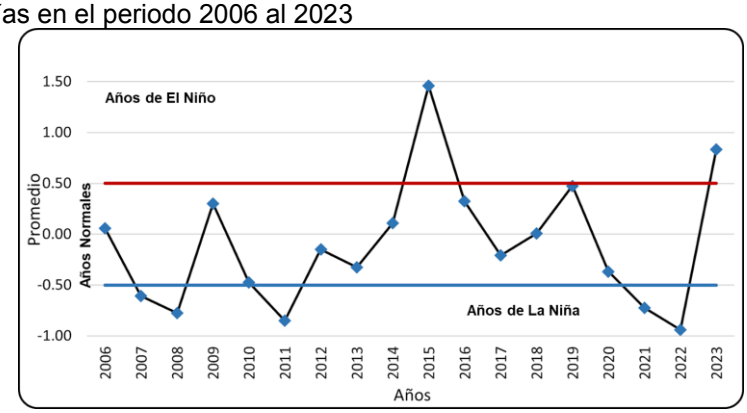


Fuente: elaboración propia con datos del SIAP, 20223.

Anomalías

Con respecto al cálculo de las anomalías a través de la información que proporciona el NOAA, se obtuvo que del periodo 2006 al 2023 se presenciaron 2 eventos de El Niño, 5 eventos de La Niña y 11 Años Normales (Figura 6).

Figura 6. Anomalías en el periodo 2006 al 2023



Fuente: elaboración propia con datos del NOAA, 2023

Evaluación de riesgo

La estimación de riesgo se realizó a partir de la relación de que se presente una anomalía y los posibles impactos en la producción. Para esto se establecieron rangos a los cuales se les consideró como producción baja, normal y alta. Esto se calculó al restarle o sumarle una desviación estándar a la producción promedio del periodo considerado, los valores para cada municipio fueron los siguientes:

Cuadro 2. Rangos de producción de miel

Producción (t) Atltzayanca	
Bajo	< 32.57
Medio	De 32.57 A 85.35
Alto	> 85.35

Producción (t) Zitlaltepec	
Bajo	< 40.49
Medio	De 40.49 A 155.58
Alto	> 155.58

Producción (t) Cuapiaxtla	
Bajo	< 19.88
Medio	De 19.88 A 78.08
Alto	> 78.08

Producción (t) Tzompantepec	
Bajo	< 24.0
Medio	De 24.0 A 72.6
Alto	> 72.6

Producción (t) Xaloztoc	
Bajo	< 37.92
Medio	De 37.92 A 97.03
Alto	> 97.03

Producción (t) Huamantla	
Bajo	< 84.77
Medio	De 24.0 A 72.6
Alto	> 241.96

Fuente: elaboración propia con datos del SIAP, 2023

Los valores para la matriz se obtuvieron a partir de la fórmula:

$$Pr(E_1|E_2) = \frac{P_r(E_1 \cap E_2)}{P_r(E_2)}$$

P(A1,B1) = probabilidad de que se presenten valores de producción menores a 32.57 en años Niño = 1/2

P(A2,B1) =probabilidad de que se presenten valores de producción menores a 32.57 en años normales = 1/11

P(A3,B1) = probabilidad de que se presenten valores de producción menores a 32.57 en año Niña= 3/5

Este procedimiento se realizó para los demás casos.

Los resultados para la matriz son:

Cuadro 3. Matriz de riesgo de anomalías

		Producción		
Municipio	**Evento**	**Alto**	**Medio**	**Bajo**
Atltzayanca	Año La Niña	0.0%	40.0%	60.0%
	Año Normal	36.0%	**54.0%**	10.0%
	Año El Niño	0.0%	**50.0%**	50.0%
Cuapiaxtla	Año La Niña	0.0%	60.0%	30.0%
	Año Normal	27.0%	**63.0%**	10.0%
	Año El Niño	0.0%	**50.0%**	50.0%
Huamantla	Año La Niña	20.0%	20.0%	**60.0%**
	Año Normal	45.0%	45.0%	10.0%
	Año El Niño	0.0%	**50.0%**	50.0%
Tzompantepec	Año La Niña	0.0%	66.0%	33.0%
	Año Normal	0.0%	**90.0%**	10.0%
	Año El Niño	0.0%	50.0%	**50.0%**
Xaloztoc	Año La Niña	33.0%	0.0%	**66.0%**
	Año Normal	36.0%	**54.0%**	10.0%
	Año El Niño	0.0%	50.0%	50.0%
Zitlaltepec	Año La Niña	0.0%	66.6%	33.3%
	Año Normal	18.0%	**72.0%**	10.0%
	Año El Niño	0.0%	50.0%	**50.0%**

Fuente: elaboración propia con datos del NOAA y del SIAP, 2023

Los resultados indican que los seis municipios en estudio son vulnerables al evento de El Niño con una probabilidad del 50% de obtener producción media y baja. Por otra parte, Atltzayanca, Huamantla y Xaloztoc son vulnerables al evento de La Niña, en promedio hay un 20% de probabilidad

de obtener producción media y 62% de probabilidad de obtener producción baja, pero a Cuapiaxtla, Tzompantepec y Zitlaltepec este evento beneficia la producción de miel con un promedio del 64% de obtener producción media. En general, a los apicultores de la zona oriente del estado les conviene la ausencia de estos dos eventos y que los años sean normales, pues aseguran el 63% de probabilidad de obtener producción media, en el caso de Tzompantepec hasta un 90% de probabilidad y Zitlaltepec un 72% (ver Cuadro 3).

CONCLUSIONES

Las anomalías de El Niño y La Niña provocan alteraciones en los patrones de floración, disponibilidad de recursos y condiciones climáticas, lo que impacta en la productividad apícola. Estos eventos modifican los ciclos fenológicos de las especies melíferas, reduciendo la recolección de néctar y polen, así como la actividad forrajera de las abejas. Se demostró la vulnerabilidad de la apicultura en municipios del estado de Tlaxcala frente a las anomalías, por lo que es necesario desarrollar e implementar estrategias de adaptación y manejo para mitigar los impactos adversos del clima y garantizar la sostenibilidad del sistema apícola y contribuir así con la seguridad alimentaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Castellanos-Ponteciano B., Gallardo-López F., Sol-Sánchez A., Landeros-Sánchez C., Díaz-Padilla G., Sierra-Figueredo P. y Santibañez-Galarza J. (2016). Impacto potencial del cambio climático en la apicultura. Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático, 2(1), 1-19. Enero del 2016. DOI: https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5673
2. Dini C., Bedascarrasbure E., Palacios M., Bulacio N., Rodríguez G. y Barreto J. (2023). Nos preparamos para recibir a “El Niño”. https://www.redlac-af.org/single-post/atenci%C3%B3n-apicultores-nos-preparamos-para-recibir-a-el-ni%C3%B1o
3. Espinosa, M. G. L. (2021). Historia de la apicultura en México. https://atlas-abejas.agricultura.gob.mx/cap3.html
4. Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (2023). https://www.noaa.gov/
5. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2005). La apicultura y los medios de vida sostenible [Folleto n°1]. Food & Agriculture Org., 2004. https://www.fao.org/3/y5110s/y5110s00.htm#Contents
6. Pabón J. y Montealegre J. (2017). Los fenómenos de El Niño y de La Niña su efecto climático e impactos socioeconómicos. https://repositorio.accefyn.org.co/bitstream/001/113/1/Fenomeno%20del%20ni%C3%B1o%20y%20la%20ni%C3%B1a%20WEB.pdf
7. Pavez P. (2017). Principios básicos en Apicultura. https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/4025/Informativo%20INIA%20N%C2%B0%20248?sequence=1&isAllowed=y
8. Pérez Vásquez C. (2019). Merma en la población de abejas (Apis melífera); un golpe al ecosistema. Revista de investigación Proyección Científica, 1(1), enero del 2019. DOI: https://doi.org/10.56785/ripc.v1i1.24
9. Rodrigo A., Medellín-Pi. (2012). Impacto del cambio climático en la apicultura. https://atlasnacionaldelasabejasmx.github.io/atlas/pdfs/1%20Cambio.pdf
10. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2020). Anuario estadístico de la producción agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/
11. Verde, J. M., Vallejos, F. L., Doorn, M. (2019). Cuaderno del apicultor. Salud apícola 2020 LATAM. https://abejasenagricultura.org/wp-content/uploads/2020/05/Cuaderno-de-campo-Colombia-25092019.pdf
12. Lara, M. (2023, 13 de julio). Tlaxcala, tercer productor de miel a nivel nacional. Abc. https://abctlax.com/tlaxcala-tercer-productor-de-miel-a-nivel-nacional/#:~:text=Tlaxcala%20es%20el%20tercer%20productor,Actualizaci%C3%B3n%20Ap%C3%ADcola%20en%20la%20entidad.
13. Arévalo, N. L. (2021). Proceso de producción de miel de abeja Apis Mellifera para la empresa apícola Colmenas el Cacique [Tesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios].

https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/a76f9853-bc22-42c6-9a36-69f22f646710/content
14. Pajuelo, A. (2019). Miel y temperatura: La cristalización de la miel. https://www.latiendadelapicultor.com/blog/la-miel-y-la-temperatura/#SiFinalmente
15. Hernández, J. y Gamarra, P. (s.f.). Apis mellifera, la abeja doméstica. Apolo observatorio de agentes polinizadores [Tríptico]. https://apolo.entomologica.es/cont/materiales/Triptico_Apis_mellifera_nivel2.pdf
16. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023, 16 de agosto). De alto impacto productivo ambiental, actividad polinizadora de las abejas: Villalobos Arámbula. https://www.gob.mx/agricultura/prensa/de-alto-impacto-productivo-ambiental-actividad-polinizadora-de-las-abejas-villalobos-arambula?idiom=es
17. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2024, 20 de agosto). Producción de Miel en México. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/produccion-de-miel-en-mexico#:~:text=Producci%C3%B3n%20de%20miel%202023&text=Aunque%20Yucat%C3%A1n%20es%20el%20l%C3%ADder,obtener%20298%20millones%20de%20pesos
18. Atlas Nacional de las Abejas y Derivados Apícolas. (2024, 17 de abril). Comunicado Oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/especiales/AtlasN_Abejas24.pdf
19. Fernández, M. (2022). Producción de miel de abeja: Guía para el productor. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/manual_miel__2022.pdf
20. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2018). “Marco de Evaluación de La Vulnerabilidad”. https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/MARCO_VULNERABILIDAD_CR2_2018.pdf.
21. Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático (2016). Vulnerabilidad al cambio climático. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-80125#:~:text=Para%20el%20Grupo%20Intergubernamental%20de,clima%20y%20los%20fen%C3%B3menos%20extremos

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE SEMILLA DEL ZAPOTE NEGRO (*Diospyros Nigra*)

Arturo Arias Alcalá[1], Rafael Zamora Vega[1], Lorena Martínez Alcántar[2], José Octavio Rodiles López[1], Osvaldo Álvarez Cortés[1], Miguel Ángel Gómez Ayala[1], Mario Lenin Molinero Cárdenas[1]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [2]Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
1800337h@umich.mx.

RESUMEN

El estrés oxidativo, resultado del desequilibrio entre la producción de radicales libres y la capacidad del organismo para neutralizarlos, ha sido asociado con el desarrollo de diversas enfermedades crónico-degenerativas, como la diabetes y los padecimientos cardiovasculares. En este contexto, la búsqueda de fuentes naturales con actividad antioxidante se ha intensificado, destacando en particular los subproductos de frutas que suelen ser desechados, como las semillas. Uno de estos casos es la semilla del zapote negro (*Diospyros nigra*), un fruto tropical ampliamente consumido por su pulpa dulce, pero cuya semilla ha recibido nula atención, dado que no existen estudios específicos que cuantifiquen la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales podrían desempeñar un papel clave en la reducción del daño oxidativo a nivel celular. Es por ello, que el objetivo del presente estudio fue evaluar la actividad antioxidante de los extractos de semilla del zapote negro obtenidos por maceración. La especie fue identificada en el Herbario de la Facultad de Biología (EBUM-UMSNH), y se obtuvo una base en polvo seca a partir de la colecta. La materia prima se almacenó en refrigeración en frascos ámbar, y se realizaron determinaciones como el análisis bromatológico, así como algunas variables de tipo fisicoquímicas como pH, acidez y color a los extractos obtenidos. Los resultados de contenido de compuestos y capacidad antioxidante se realizaron mediante ensayos de determinación de fenoles totales, flavonoides totales, al igual que la inhibición de los radicales DPPH• y $OH^{\bullet -}$. Se obtuvo una baja concentración de fenoles y flavonoides totales a diferencia de lo obtenido en estudios previos con la pulpa y cáscara, pero la capacidad antioxidante fue significativamente mayor en los extractos de semilla para inhibir $OH^{\bullet -}$ que para DPPH•, superando incluso a las otras partes del fruto. El tratamiento de las muestras incluyó diferentes concentraciones, temperaturas y tiempos de extracción. Este hallazgo sugiere que la semilla podría contener polímeros que con los diferentes tratamientos son hidrolizados, liberando compuestos con capacidad antioxidante. A pesar de sus propiedades, la semilla del zapote negro continúa siendo subutilizada, generando un desperdicio significativo de un recurso con posibles beneficios para la salud. Por ello, es crucial fomentar la investigación en torno a sus aplicaciones y promover su incorporación en productos que contribuyan a una alimentación más funcional y sostenible. En conclusión, la semilla del zapote negro representa una alternativa prometedora en la búsqueda de compuestos bioactivos con potencial antioxidante. Su aprovechamiento no solo reduciría el desperdicio alimentario, sino que también abriría nuevas posibilidades en el desarrollo de suplementos y alimentos funcionales enfocados en la prevención del daño celular y el mantenimiento de la salud.

INTRODUCCIÓN

El zapote negro (*Diospyros nigra*) es una especie frutal tropical originaria de México y otras zonas de América Central, que ha formado parte de la alimentación tradicional de diversas comunidades locales. Aunque por mucho tiempo su consumo se limitó al ámbito regional, en años recientes ha despertado un interés creciente dentro del ámbito científico, gracias a su posible aplicación en la salud preventiva, donde destacan sus efectos nutracéuticos y su riqueza en compuestos bioactivos con actividad antioxidante (Merino *et al.*, 2011; Arana y Cevallos, 2016). Estos compuestos tienen la capacidad de neutralizar especies reactivas de oxígeno, ayudando a disminuir el impacto del estrés oxidativo en el organismo y, por ende, el riesgo de enfermedades crónicas no transmisibles como el

cáncer, afecciones cardiovasculares y trastornos metabólicos (López *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2023).

Investigaciones recientes han identificado que el fruto del zapote negro presenta concentraciones relevantes de carotenoides y compuestos fenólicos, directamente relacionados con su actividad antioxidante. Entre los metabolitos detectados destacan los ácidos ferúlico y sinápico, la catequina, así como los carotenoides β-caroteno y luteína, conocidos por su contribución a la defensa celular frente a radicales libres. Este perfil bioquímico sitúa al zapote negro a la par de otros frutos tropicales ampliamente reconocidos por su poder antioxidante (Yahia *et al.*, 2011). Además, análisis realizados sobre su pulpa revelan una presencia considerable de vitamina C y tocoferoles, micronutrientes que refuerzan su capacidad para capturar radicales libres (Merino *et al.*, 2022).

Más allá de su función antioxidante, los extractos de *Diospyros nigra* también podrían ejercer efectos positivos a nivel celular, modulando vías relacionadas con la inflamación y la proliferación celular, lo que amplía su potencial uso terapéutico (Díaz *et al.*, 2023). En otras especies del mismo género se ha documentado actividad inmunomoduladora y antiproliferativa, lo cual abre la posibilidad de explorar al zapote negro no solo como fuente de antioxidantes naturales, sino también como coadyuvante en el tratamiento de enfermedades inflamatorias o incluso cáncer (Llacuna y Mach, 2012; Quiñones *et al.*, 2012; Adu *et al.*, 2022).

A pesar de estas cualidades, el zapote negro continúa siendo un fruto subutilizado. Debido a que, a pesar de ser una fuente de metabolitos fitoquímicos relevante, gran parte de su producción se pierde debido a su rápida degradación postcosecha, a las limitaciones logísticas en su comercialización y a su escasa popularidad en los mercados, factores que lo mantienen fuera del consumo masivo (Jiménez y Guerrero, 2021). Esta situación genera altos volúmenes de desperdicio, especialmente de partes no comestibles o no aprovechadas como semillas y cáscaras, una realidad que contrasta con la creciente evidencia científica que resalta el valor funcional de estos derivados. En particular, se ha demostrado que estos subproductos contienen compuestos fitonutrientes valiosos y que muchas semillas de frutas poseen perfiles fitoquímicos igual o incluso más complejos que la pulpa, lo que convierte su recuperación en una estrategia clave para reducir el desperdicio y generar valor añadido (Silva *et al.*, 2020; Bala *et al.*, 2023).

La revalorización de subproductos agroindustriales -como lo son las semillas de frutas- es cada vez más urgente. A escala global, el desaprovechamiento de subproductos agrícolas se ha transformado en un tema de preocupación ambiental y económica. La FAO estima que entre un tercio y un cuarto de la producción alimentaria destinada para consumo humano -cerca de 1300 millones de toneladas- termina desechada, donde entre el 40 y 50% corresponde a frutas, hortalizas, raíces y semillas; lo cual no sólo representa una pérdida de recursos, sino también una fuente importante de contaminación ambiental (Dhen *et al.*, 2017; Palacios y Luna, 2023). Estos residuos, cuando son gestionados adecuadamente, pueden transformarse en ingredientes funcionales, suplementos nutricionales o incluso en insumos farmacéuticos gracias a su contenido en compuestos antioxidantes, como se ha reportado anteriormente en semillas de melón, sandía, mora y aguacate (Isaza *et al.*, 2020; Ramírez *et al.*, 2024).

En este contexto, la semilla del zapote negro a menudo desechada, representa uno de estos casos aún no explorados en profundidad. Aunque se sabe que el fruto es una fuente importante de carbohidratos, fibra, vitamina C y diversos metabolitos secundarios, su semilla no ha sido suficientemente estudiada, lo que impide conocer con certeza su valor funcional. Esto representa una oportunidad para llenar un vacío de conocimiento y aportar información relevante que justifique su incorporación en productos de valor añadido.

La obtención de compuestos bioactivos a partir de matrices vegetales, en particular de semillas, se ha consolidado como una prioridad en el ámbito de la investigación actual. Esto ha motivado el desarrollo de múltiples estudios enfocados en perfeccionar las técnicas de extracción, aislamiento y caracterización de estos metabolitos de origen natural. No obstante, la amplia diversidad estructural

de las subclases de polifenoles dificulta la estandarización de un método único para su recuperación eficiente (Ivanović *et al.*, 2020). Frente a este desafío, métodos tradicionales como la maceración y la extracción sólido-líquido han demostrado ser alternativas efectivas para extraer estos compuestos desde matrices complejas como las semillas, permitiendo conservar su actividad biológica y favoreciendo su aplicación potencial en formulaciones funcionales o terapéuticas (Adu *et al.*, 2022).

Además de contribuir al aprovechamiento integral del fruto y a la economía circular en el sector agroalimentario, esta investigación busca abrir nuevas posibilidades en el diseño de formulaciones nutracéuticas enfocadas en la prevención del daño celular, la salud metabólica y la sostenibilidad productiva. Por ello, el presente trabajo se plantea como el primero en caracterizar el perfil antioxidante de los extractos de semilla utilizando el método de maceración, con el objetivo de identificar compuestos con potencial terapéutico y funcional.

TEORÍA

En las últimas décadas, las enfermedades crónico-degenerativas (ECD), como el cáncer, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares, han experimentado un incremento alarmante debido a estilos de vida poco saludables. Ante este panorama, la búsqueda de fuentes naturales con propiedades funcionales ha ganado relevancia, destacando en particular los subproductos de frutas que suelen ser desechados, como las semillas (Ramírez *et al.*, 2024). Uno de estos casos es la semilla del zapote negro (*Diospyros nigra*), un fruto tropical reconocido por su alto contenido de carbohidratos, fibra y vitamina C, así como por sus metabolitos secundarios con capacidad antioxidante (Merino *et al.*, 2022); sin embargo, su semilla ha recibido nula atención, puesto que no existen estudios específicos que verifiquen la presencia de estos compuestos, los cuales podrían desempeñar un papel clave en la reducción del daño oxidativo a nivel celular. Por ello, el objetivo del presente estudio es evaluar la actividad antioxidante de los compuestos bioactivos provenientes de los extractos de semilla del zapote negro obtenidos mediante maceración.

PARTE EXPERIMENTAL

Transformación y conservación del fruto

Se utilizó como materia prima el fruto del zapote negro, el cual fue recolectado en el municipio de Ziracuaretiro, perteneciente al estado de Michoacán, México.

-Proceso de clasificación inicial

Se seleccionaron ejemplares de zapote negro en estados avanzados de desarrollo, cercanos tanto a su maduración fisiológica como a su óptimo consumo. Se priorizaron frutos con diámetros de entre 8 y 10 cm, tonalidades verde oliva y firmeza estructural; mientras que aquellos que evidenciaran deterioro físico, actividad de plagas, síntomas de fermentación, inmadurez evidente o texturas blandas con exceso de humedad interna fueron descartados.

-Higienización y fraccionamiento

Con el fin de garantizar la inocuidad del material vegetal, los frutos fueron desinfectados mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 1% durante 15 minutos. Posteriormente, se enjuagaron utilizando agua potable o destilada. Luego del proceso de limpieza, se procedió a separar la pulpa del resto de las estructuras (cáscara y semillas), distribuyendo cada componente por separado en bandejas, procurando una capa de 1 cm de espesor para aumentar la superficie y mejorar la eficiencia en la eliminación de agua (Figura 1).

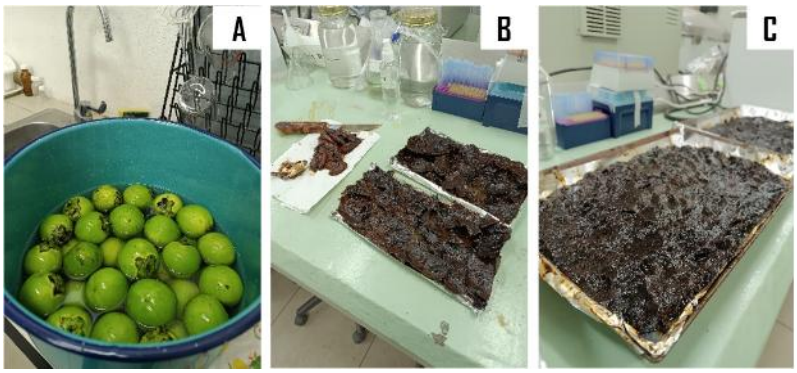


Figura 1. Frutos en solución de hipoclorito de sodio al 1% (A), cáscara y semillas retiradas (B) y pulpa distribuida en bandejas de aluminio previo a secado (C).

-Deshidratación y reducción de tamaño

Las diferentes partes del fruto se sometieron a un proceso de secado en estufa, manteniéndose a 50 °C por un periodo de 48 horas. Tras este paso, el material seco fue pulverizado utilizando una licuadora de uso doméstico y posteriormente pasó por un tamiz con malla #40 (400 µm) para estandarizar el tamaño de partícula. Finalmente, los polvos resultantes fueron almacenados de forma individual en envases de vidrio ámbar herméticos, conservándolos a 4 °C y protegidos de la exposición lumínica directa (Figura 2).

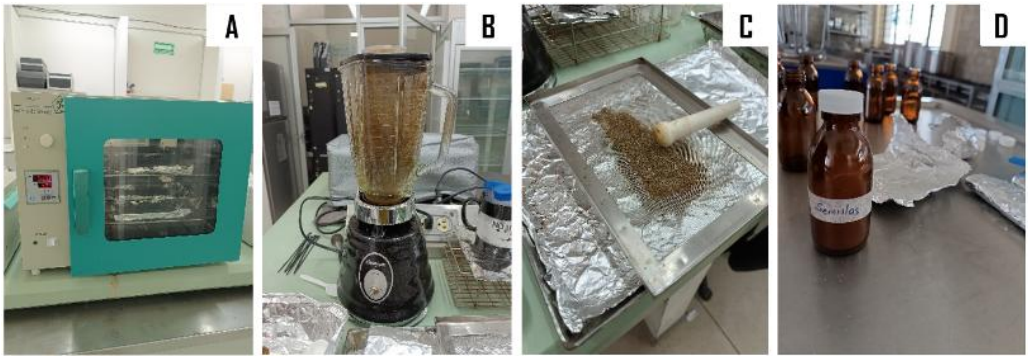


Figura 2. Fruto separado en bandejas (pulpa, cáscara y semillas) en un horno a 50 °C (A), triturado tras secado (B) y tamizado en una malla #40 (C). Almacenado en frascos ámbar (D).

Análisis proximal de la muestra

Se cuantificó el porcentaje de humedad, cenizas, proteína, fibra cruda y extracto etéreo del polvo de las semillas del zapote negro por los procedimientos estándar de AOAC (Association of Official Analytical Collaboration), y los hidratos de carbono se obtuvieron por diferencia, restando la suma de la humedad, proteína, extracto etéreo, fibra y cenizas del valor total de 100.

-Determinación de humedad

La determinación del contenido de humedad se realizó utilizando el método de secado en estufa, conforme a lo establecido por la AOAC (método 925.10). Para ello, cerca de 3 gramos de muestra fresca fueron colocados en cápsulas llevadas a peso constante, que se introdujeron en una estufa a 100 °C durante un periodo inicial de 3 horas. Al finalizar este tiempo, las cápsulas fueron trasladadas a un desecador para permitir su enfriamiento y pesado. Este ciclo se repitió hasta peso constante, permitiendo calcular la pérdida de agua por la diferencia entre el peso inicial y el final.

-Determinación del contenido mineral (cenizas)

El análisis de cenizas se llevó a cabo conforme al método AOAC 923.03, el cual se basa en la eliminación de la materia orgánica mediante incineración a alta temperatura. Para ello, se pesaron 3 g de muestra en un crisol y se sometieron inicialmente a carbonización a baja temperatura. Luego, los crisoles fueron colocados en una mufla a 500-600 °C durante aproximadamente 3 horas, hasta obtener un residuo blanco correspondiente a la fracción mineral. Finalmente, se enfrió en desecador y se pesó hasta alcanzar un valor constante.

-Determinación de proteína total
La cuantificación de proteína se realizó mediante el método Kjeldahl (AOAC 2001.11), basado en la conversión del nitrógeno presente en la muestra en amoníaco (NH_3). Se pesaron 0.7 g de muestra desgrasada y seca en un matraz Kjeldahl, añadiendo una mezcla catalítica compuesta por 8 g de K_2SO_4 y 0.7 g de $CuSO_4$, junto con 10 mL de H_2SO_4 concentrado. La digestión se llevó a cabo durante aproximadamente 1 hora, hasta lograr una solución transparente. Tras enfriamiento y dilución con agua destilada, se realizó la neutralización y destilación alcalina con NaOH, recolectando el NH_3 liberado en una solución de H_3BO_3. Finalmente, se procedió a la titulación con HCl 0.1 N y se calcularon los valores de proteína a partir del nitrógeno aplicando un factor de conversión (6.25).

-Determinación de extracto etéreo (grasa total)
El contenido de lípidos se determinó mediante el método Soxhlet, conforme a la AOAC 920.39, que consiste en extraer las grasas utilizando éter etílico como disolvente orgánico. Se colocaron 3 g de muestra en un cartucho de extracción y se sometieron a un ciclo continuo de reflujo durante 4 a 6 horas. Posteriormente, el disolvente fue evaporado, y el residuo graso se secó a 105 °C hasta peso constante, tras su enfriamiento en desecador.

-Determinación de fibra cruda (fibra indigestible)
El análisis de fibra se realizó conforme al método AOAC 962.09, que simula el proceso digestivo humano mediante digestiones sucesivas con ácido y álcali. Se pesaron 2 g de muestra y se sometieron a digestión ácida con H_2SO_4 al 1.25% durante 30 minutos, seguida de una digestión alcalina con NaOH al 1.25% bajo las mismas condiciones. Tras cada etapa, se filtró y lavó con agua caliente. El residuo final se secó a 105 °C, se incineró en mufla a 550 °C y se pesó antes y después de la combustión para calcular el contenido de fibra.

Obtención de extractos por maceración
Para la recuperación de compuestos con actividad antioxidante se empleó el método de maceración, bajo un enfoque de optimización experimental de superficie de respuesta mediante un diseño Box-Behnken (Tabla 1). Este diseño estadístico permitió analizar la influencia de tres factores o variables de respuesta claves: la composición del solvente (porcentaje agua-etanol, considerando etanol al 96°), la temperatura del proceso y la duración de éste, cada uno evaluado en tres niveles.
Las mezclas utilizadas como medio de extracción fueron combinaciones hidroalcohólicas con relaciones volumétricas de 25:75, 50:50 y 75:25 (agua-etanol 96%). Las temperaturas evaluadas fueron 40, 60 y 80 °C, mientras que los tiempos de contacto entre soluto y disolvente se fijaron en 30, 60 y 90 minutos, respectivamente. Asimismo, se mantuvo una relación constante de masa a volumen de 1:10 (1 gramo de material vegetal por cada 10 mL de solución extractiva), con el objetivo de asegurar una adecuada difusión de los compuestos bioactivos al medio líquido. Los extractos de cada tratamiento se filtraron al vacío en papel filtro de poro abierto y poro cerrado, o en papel Whatman en caso de ser necesario, y nuevamente se almacenaron en envases de vidrio ámbar a una temperatura de -4 °C.

Tabla 1. Optimización experimental de superficie de respuesta -diseño Box-Behnken- para extracto de semilla del zapote negro (*Diospyros nigra*).

CE	*Agua (%)*	*Temp (°C)*	*Tiempo (min)*	*Fenoles totales (mg EAG/100 mL)*	*Flavonoides (mg EQ/100mL)*	*DPPH• (IC_{50} mg/mL)*	*$OH^{\bullet}$ (IC_{50} mg/mL)*
1	25	40	60	-	-	-	-
2	25	60	30	-	-	-	-
3	25	60	90	-	-	-	-
4	25	80	60	-	-	-	-
5	50	40	30	-	-	-	-
6	50	40	90	-	-	-	-
7	50	60	60	-	-	-	-
8	50	60	60	-	-	-	-
9	50	60	60	-	-	-	-
10	50	60	60	-	-	-	-
11	50	60	60	-	-	-	-
12	50	80	30	-	-	-	-
13	50	80	90	-	-	-	-
14	75	40	60	-	-	-	-
15	75	60	30	-	-	-	-
16	75	60	90	-	-	-	-
17	75	80	60	-	-	-	-

CE, Corrida experimental; Temp, temperatura; EAG, equivalentes de ácido gálico; EQ, equivalentes de quercetina; IC_{50}, Concentración Inhibitoria Media. Los datos de fenoles totales, flavonoides, DPPH• y $OH^{\bullet}$ son el promedio de los triplicados.

Evaluación antioxidante total

-Contenido de compuestos fenólicos

La estimación de los fenoles totales se efectuó adaptando los procedimientos descritos por Singleton *et al.* (1999) y Taga *et al.* (1984). Para ello, se mezclaron 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (preparado en una dilución 1:1) con 100 µL del extracto correspondiente. La disolución se ajustó con 1 o 2 mL de agua (dependiendo del tipo de tejido vegetal procesado y su posible interferencia cromática). Tras una breve agitación, la mezcla se dejó en reposo durante 2 minutos antes de incorporar 2 mL de una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 2% (m/v). Posteriormente, se agitó nuevamente y se incubó por 30 minutos en condiciones de oscuridad. La absorbancia se registró a una longitud de onda de 750 nm utilizando un espectrofotómetro UV-vis (modelo SHIMADZU UV-1601). Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido gálico (mg EAG/100 mL).

-Contenido de flavonoides

El análisis cuantitativo de flavonoides se realizó con base en la metodología de Dewanto *et al.* (2002), incorporando ajustes menores. Se preparó una mezcla compuesta por 0.5 mL de una solución de cloruro de aluminio ($AlCl_3$) al 2% y 2 mL del extracto, previamente disuelto en 1 o 2 mL de agua, según el tejido vegetal evaluado. La mezcla fue agitada y mantenida en reposo durante 30 minutos en condiciones de oscuridad. La lectura espectrofotométrica se llevó a cabo a 415 nm con el equipo UV-vis SHIMADZU UV-1601. Los resultados obtenidos se expresaron en términos de equivalentes de quercetina (mg EQ/100 mL).

Análisis de la actividad antioxidante

-Capacidad de neutralización del radical DPPH• (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

El potencial antioxidante frente al radical libre DPPH se evaluó siguiendo una adaptación del protocolo propuesto por Brand-Williams *et al.* (1995). En cada ensayo, se mezclaron 100 µL del extracto o del estándar (ácido gálico) con 1.9 mL de una solución de DPPH. La mezcla se agitó brevemente y se mantuvo en oscuridad durante 30 minutos para favorecer la reacción. Posteriormente, se midió la absorbancia a 515 nm utilizando un espectrofotómetro UV-vis (modelo SHIMADZU UV-1601). Los datos obtenidos se expresaron como equivalentes de ácido gálico, y se

calculó el valor de IC_{50}, correspondiente a la concentración necesaria para inhibir el 50% de la actividad del radical.

-Capacidad de eliminación del radical hidroxilo ($OH^{\bullet}$)
La evaluación de la actividad neutralizante del radical hidroxilo se llevó a cabo adaptando las metodologías propuestas por Smirnoff y Cumbes (1989), así como por Zhang *et al.* (2012). Se prepararon las siguientes soluciones: sulfato ferroso ($FeSO_4$) a 8 mM, ácido salicílico ($C_7H_6O_3$) a 3 mM y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 2%, todas disueltas en agua destilada. La mezcla de reacción consistió en 667 µL del extracto evaluado, 500 µL de dimetilsulfóxido (DMSO), 200 µL de solución de $FeSO_4$, 667 µL de ácido salicílico y 167 µL de H_2O_2. Esta mezcla fue incubada en baño María a 37 °C durante 30 minutos. Finalizada la incubación, se añadieron 299 µL de agua destilada y se registró la absorbancia a 510 nm con el espectrofotómetro UV-vis (SHIMADZU UV-1601). La eficacia antioxidante se determinó mediante el cálculo del IC_{50}.

RESULTADOS

Análisis proximal de la muestra

El análisis proximal del polvo obtenido a partir de las semillas de zapote negro reveló que la fibra cruda (56.27% ± 0.70), seguida por los carbohidratos (10.35%) y las proteínas (6.01% ± 0.102), constituyen los principales componentes presentes en la muestra (Tabla 2). Estos resultados fueron comparados con los perfiles nutricionales de otras semillas, cereales y leguminosas como las semillas de guayaba, y semillas de jitomate, cacao, cacahuate, arroz, frijol, maíz y café; según lo reportado por Palacios y Luna (2023).

Tabla 2. Composición proximal de las semillas del zapote negro (*Diospyros nigra*).

Parámetro	*Valor (% b.h.)*
Humedad	26.14 ± 0.25
Cenizas	1.05 ± 0.14
Proteínas	6.01 ± 0.10
Lípidos	0.17 ± 0.03
Fibra cruda	56.27 ± 0.70
**Carbohidratos*	10.35

b.h.= Base húmeda. Valor promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar. *Resultado obtenido por diferencia.

Las semillas de zapote negro registraron un contenido de humedad del 26.14%, significativamente superior al observado en otros materiales vegetales como las semillas de jitomate (9.93%), cacao (6.03%), café (6.06%), cacahuate (4.2%) y diversos granos como arroz (12.22%), frijol (12.32%) y maíz (10.07%).

En cuanto al contenido mineral, representado por el porcentaje de cenizas (1.05%), las semillas de zapote negro presentan valores similares al cacahuate (2.15%) y maíz (2.07%), pero menores en comparación con las semillas de jitomate (3.92%), frijol (3.41%) y cacao (4.34%).

Respecto al contenido proteico, el valor determinado fue de 6.01%, lo cual resulta considerablemente más bajo que en las semillas de guayaba (30.49%), jitomate (26.93%), frijol (23.87%) y cacahuate (24.48%), así como en cereales como arroz (12.22%) y maíz (10.07%). Sin embargo, es similar al registrado para cacao (8.6%) y café (6.06%).

El nivel de lípidos fue el más bajo entre todos los componentes, con apenas 0.17%, comparable al del arroz (0.4%). No obstante, este valor es muy inferior al de otras semillas y granos oleaginosos

como la semilla de guayaba (17.39%), semilla de jitomate (14.02%), frijol (1.62%), café (10.03%), cacahuate (40.80%) y cacao (50.87%).

Por otro lado, la fibra cruda fue el componente más abundante entre las semillas analizadas, alcanzando un 56.27%, lo cual supera ampliamente al contenido existente en semillas de jitomate (26.99%), semillas de guayaba (20.18%), cacahuate (11.42%) y cacao (4.64%); destacando como una fuente excepcional de fibra dietética.

Por último, el contenido de carbohidratos fue de 10.35%, lo que lo ubica como el segundo componente mayoritario en las semillas de zapote negro. Este valor es menor al de las semillas de jitomate (26.99%), y se aproxima al de guayaba (14.36%) y cacahuate (12.45%).

Obtención de extractos por maceración

En la extracción de compuestos antioxidantes, un factor relevante e importante a considerar fue la polaridad del disolvente, ya que tiene un gran impacto en el tipo de compuestos a extraer y en su rendimiento. Investigaciones previas han demostrado que disolventes polares como el agua y etanol o sus combinaciones son ideales para la extracción eficiente tanto de polifenoles y flavonoides.

A partir del análisis estadístico aplicado al diseño experimental de la semilla y otros tejidos vegetales -anteriormente realizados- del zapote negro, se obtuvieron extractos sometidos a diversas condiciones experimentales de concentración, temperatura y duración del proceso, que se almacenaron en tubos Eppendorf de 50 mL tal como se observa en la Figura 3.

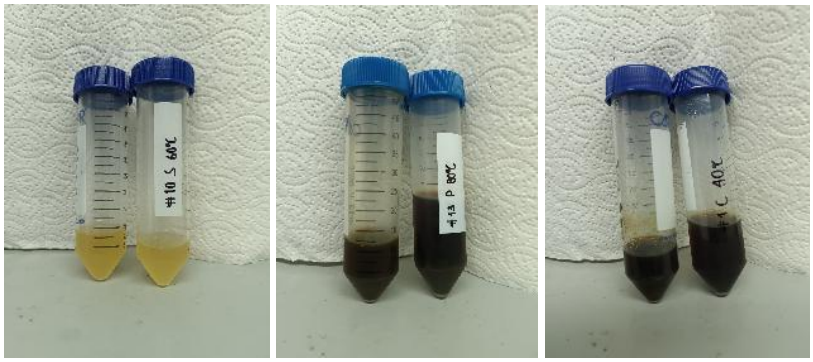


Figura 3. Extractos hidroalcohólicos de semilla, pulpa y cáscara del zapote negro (*Diospyros nigra*).

En este diseño, se identificaron las condiciones óptimas de extracción por maceración para semilla, mostrando únicamente los mejores tres tratamientos, los cuales incluyeron mezclas hidroalcohólicas con valores de 50% y 75% de contenido acuoso, empleadas a temperaturas de 80 °C y 60 °C, respectivamente, durante periodos de extracción de 90 y 30 minutos (Tabla 3).

Tabla 3. Determinación de compuestos y capacidad antioxidante de semilla del zapote negro (*Diospyros nigra*).

CE	*Agua (%)*	*Temp (°C)*	*Tiempo (min)*	*Fenoles totales (mg EAG/100 mL)*	*Flavonoides (mg EQ/100mL)*	*DPPH•* *(IC_{50} mg/mL)*	*$OH^{\bullet}$* *(IC_{50} mg/mL)*
12	50	80	30	12.3171	**8.4282**	**86.4925**	4.9804
13	50	80	90	**13.1311**	7.7917	98.8001	**4.4693**
16	75	60	90	7.0951	3.8449	257.5223	4.4997

CE, Corrida experimental; Temp, temperatura; EAG, equivalentes de ácido gálico; EQ, equivalentes de quercetina; IC_{50}, Concentración Inhibitoria Media. Los datos de fenoles totales, flavonoides, DPPH• y $OH^{\bullet}$ son el promedio de los triplicados.

El tratamiento 13 obtuvo la mayor extracción de fenoles totales, 13.13 mg EAG/100mL y la mayor actividad antioxidante contra OH•⁻, mientras que la mayor extracción de flavonoides, 8.43 mg EQ/100mL, así como la mayor actividad antioxidante en DPPH• se dio con el tratamiento 12.
A su vez, se puede apreciar una baja concentración de fenoles y flavonoides totales a diferencia de lo obtenido en estudios previos realizados con la pulpa y cáscara del zapote negro (Tabla 4 y 5).

Tabla 4. Determinación de compuestos y capacidad antioxidante de la pulpa del zapote negro (*Diospyros nigra*).

CE	*Agua (%)*	*Temp (°C)*	*Tiempo (min)*	*Fenoles totales (mg EAG/100 mL)*	*Flavonoides (mg EQ/100mL)*	*DPPH• (IC_{50} mg/mL)*	*OH•⁻ (IC_{50} mg/mL)*
4	25	80	60	99.3256	83.6597	**6.4054**	6.4344
12	50	80	30	**238.2791**	**143.9375**	10.3891	5.5796
14	75	40	60	118.0465	133.4861	15.2987	**4.3252**

CE, Corrida experimental; Temp, temperatura; EAG, equivalentes de ácido gálico; EQ, equivalentes de quercetina; IC_{50}, Concentración Inhibitoria Media. Los datos de fenoles totales, flavonoides, DPPH• y OH•⁻ son el promedio de los triplicados.

Los resultados del modelo experimental para pulpa indican que el tratamiento 12 produjo la mayor extracción de fenoles totales, 238.28 mg EAG/100mL y flavonoides, 143.94 mg EAG/100mL; mientras que la mayor actividad antioxidante en DPPH• y OH•⁻ se dio en el tratamiento 4 y 14, respectivamente.

Tabla 5. Determinación de compuestos y capacidad antioxidante de la cáscara del zapote negro (*Diospyros nigra*).

CE	*Agua (%)*	*Temp (°C)*	*Tiempo (min)*	*Fenoles totales (mg EAG/100 mL)*	*Flavonoides (mg EQ/100mL)*	*DPPH• (IC_{50} mg/mL)*	*OH•⁻ (IC_{50} mg/mL)*
13	50	80	90	91.2812	63.7292	15.0823	7.3661
15	75	60	30	83.5116	66.8889	17.6251	**6.7076**
17	75	80	60	**105.7104**	**85.6042**	**13.2347**	8.5995

CE, Corrida experimental; Temp, temperatura; EAG, equivalentes de ácido gálico; EQ, equivalentes de quercetina; IC_{50}, Concentración Inhibitoria Media. Los datos de fenoles totales, flavonoides, DPPH• y OH•⁻ son el promedio de los triplicados.

Los resultados del modelo experimental para cáscara demuestran que el tratamiento 17 produjo la mayor extracción de fenoles totales, con 105.71 mg EAG/100mL y de flavonoides, con 85.60 mg EAG/100mL; así como la mayor actividad antioxidante en DPPH•, mientras que en OH•⁻ se dio en el tratamiento 15.

Los fenoles totales se extrajeron mejor y en mayor cantidad que los flavonoides en todas las estructuras, siendo ambos compuestos mayores en el tejido vegetal de la pulpa con respecto a la cáscara y semilla como se muestra en la Tabla 3, 4 y 5.

Si bien los niveles de compuestos fenólicos y flavonoides detectados en la semilla bajo estas condiciones fueron menores en comparación con los reportados previamente para la pulpa y la cáscara del zapote negro, los extractos obtenidos mostraron una destacada capacidad para neutralizar el radical hidroxilo (OH•⁻), superando incluso la eficacia observada frente al radical DPPH• y los valores registrados en otras fracciones del fruto.

El tratamiento de las muestras incluyó diferentes concentraciones, temperaturas y tiempos de extracción. Este hallazgo sugiere que la semilla podría contener polímeros que con los diferentes tratamientos son hidrolizados, liberando compuestos con capacidad antioxidante.

Estos hallazgos posicionan a la semilla del zapote negro como un recurso de alto interés en la exploración de fuentes alternativas de antioxidantes naturales. Más allá de su potencial como ingrediente funcional, su valorización podría contribuir significativamente a la reducción del desperdicio de subproductos agroindustriales. En conjunto, los resultados abren una vía hacia el desarrollo de formulaciones nutracéuticas o alimentos funcionales orientados a la protección frente al estrés oxidativo y fortalecimiento de la salud preventiva.

CONCLUSIONES

Las semillas del zapote negro (*Diospyros nigra*) presentaron una composición destacada, caracterizada principalmente por un alto contenido de fibra cruda (56.27%), junto con proporciones menores de carbohidratos (10.35%) y proteínas (6.01%).

Asimismo, la investigación realizada determinó que los compuestos presentes en la semilla del zapote negro contienen compuestos bioactivos que se pudieran ser producidos por la hidrólisis de polímeros presentes tras las altas temperaturas y tiempos de los diferentes tratamientos. Estos compuestos fitoquímicos ejercen una buena actividad antioxidante para neutralizar el radical hidroxilo ($OH^{\bullet -}$), comparado y superando a los extractos de pulpa y cáscara previamente realizados, los cuales presentaron eficacia frente al radical DPPH•.

La comparación de la actividad antioxidante de la semilla del zapote negro demuestra que es un buen agente antioxidante capaz de capturar los radiales libres, obteniendo valores de IC_{50} (mg/mL) de 4.4693 para el radical $OH^{\bullet -}$ siendo el mejor tratamiento a 80 °C con un tiempo de 90 min.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adu, O. T., Naidoo, Y., Lin, J., Adu, T. S., Sivaram, V., Dewir, Y. H. y El-Banna, A. N. (2022). Phytochemical Screening and Biological Activities of *Diospyros villosa* (L.) De Winter Leaf and Stem-Bark Extracts. *Horticulturae*, 8, 945. doi: 10.3390/horticulturae8100945
2. Arana, K. M. y Cevallos, A. A. (2016). Análisis de la *Diospyros digyna* (Zapote negro) como materia prima en la elaboración de un producto en el área de la repostería [tesis de licenciatura, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UN. Disponible en: http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/12379
3. Bala, S., Garg, D., Sridhar, K., Inbaraj, B. S, Singh, R., Kamma, S. y Sharma, M. (2023). Transformation of agro-waste into value-added bioproducts and bioactive compounds: Micro/nano formulations and application in the agri-food-pharma sector. *Bioengineering*, 10(2): 152. doi: 10.3390/bioengineering10020152
4. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT Food Sci. Technol.*, 28, 25–30. doi: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5
5. Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K. y Liu, R. H. (2002). Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *J. Agric. Food Chem.*, 50, 3010 – 3014. doi: 10.1021/jf0115589
6. Dhen, N., Rejeb, I. B., Martínez, M. M., Román, L., Gómez, M. y Gargouri, M. (2017). Effect of apricot kernels flour on pasting properties, pastes rheology and gels texture of enriched wheat flour. *European Food Research and Technology*, 243: 419–428. doi: 10.1007/s00217-016-2755-4
7. Díaz-Corona, L. R., Macías-Rodríguez, M. E., Arellano-Pérez, L. M., Romero-Yerena, A., Martínez-Preciado, A. H. y Reyes-Becerril, M. (2023). Immunostimulant effects of diet supplementation with yellow (*Pouteria campechiana*), white (*Casimiroa edulis*), and black (*Diospyros digyna*) sapote nanocapsules on laying hens: *in vitro* and *in vivo* study. *Tropical Animal Health and Production*, 55(6), 360. doi: 10.1007/s11250-023-03778-y
8. Isaza, S. P., Jaramillo, M. A. y Mora, C. L. (2020). Actividad antioxidante en subproductos de mora y aguacate; identificación preliminar de su potencial en el desarrollo de ingredientes con

aplicaciones industriales. [trabajo de grado, Universidad CES]. Repositorio Institucional Disponible: https://repository.ces.edu.co/items/ca3754fa-5009-4548-b065-d1abe848a634
9. Ivanović, M., Islamčević-Razboršek, M. y Kolar, M. (2020). Innovative extraction techniques using deep eutectic solvents and analytical methods for the isolation and characterization of natural bioactive compounds from plant material. *Plants*, 9(11): 1428. doi: 10.3390/plants9111428
10. Jiménez-González, O. y Guerrero-Beltrán, J. A. (2021). *Diospyros digyna* (black sapote), an Undervalued Fruit: A Review. *ACS Food Sci. Technol.*, 1(1), 3-11. doi: 10.1021/acsfoodscitech.0c00103
11. Llacuna, L. y Mach, N. (2012). Papel de los antioxidantes en la prevención del cáncer. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 16(1), 16-24. doi: 10.1016/S2173-1292(12)70067-4
12. López, A., Fernando, C., Lazarova, Z., Bañuelos, R. y Sánchez, S. H. (2012). Antioxidantes, un paradigma en el tratamiento de enfermedades. *Revista ANACEM* (Impresa), 6(1), 48-53. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264233113
13. Merino, L. (2011). Evaluación de propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante de zapote negro (*Diospyros digyna* Jacq.) [tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. Repositorio Institucional UN. Disponible en: https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/46806
14. Merino-Sánchez, L., Romero-Luna, H. E., García-Barradas, O., Mendoza-López, M. R. y Jiménez-Fernández, M. (2022). Physicochemical and antioxidant changes of black sapote (*Diospyros digyna*, Ebenaceae) during on-tree fruit development. *Acta Botánica Mexicana*, (129), e2032. doi: 10.21829/abm129.2022.2032
15. Palacios-Pérez, F. y Luna-Suárez, S. (2023). Estudio de la composición química de semillas de zapote negro. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 708–713. doi: 10.29105/idcyta.v8i1.92
16. Quiñones, M., Miguel, M. y Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 27(1), 76-89. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112012000100009&lng=es&tlng=es
17. Ramírez-Aragón, M. G., Borroel-García, V. J., López-Martínez, J. D., Nieto-Garibay, A. y García-Hernandez, J. L. (2024). Extracción de compuestos antioxidantes en sandía y melón en la Comarca Lagunera. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(1). doi: 10.19136/era.a11n1.3953
18. Ribeiro, A., Serrano, R., da Silva, I. B. M., Gomes, E. T., Pinto, J. F. y Silva, O. (2023). The Genus *Diospyros*: A Review of Novel Insights into the Biological Activity and Species of Mozambican Flora. *Plants*, 12, 2833. doi: 10.3390/plants12152833
19. Silva, J. S., Ortiz, D. W., García, L. G. C., Asquieri, E. R., Becker, F. S. y Damiani, C. (2020). Effect of drying on nutritional composition, antioxidant capacity and bioactive compounds of fruits co-products. *Food Science and Technology*, 40: 810-816. doi: 10.1590/fst.21419
20. Singleton, V. L., Orthofer, R., Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods Enzymol*, 299, 152–178. doi: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1
21. Smirnoff, N. y Cumbes, Q. (1989). Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochemistry*, 28, 1057–1060. doi: 10.1016/0031-9422(89)80182-7
22. Taga, M. S., Miller, E. E. y Pratt, D. E. (1984). Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 61, 928–931. doi: 10.1007/BF02542169
23. Yahia, E. M., Gutierrez-Orozco, F. y Arvizu-de Leon, C. (2011). Phytochemical and antioxidant characterization of the fruit of black sapote (*Diospyros digyna* Jacq.). *Food Research International*, 44(7), 2210-2216. doi: 10.1016/j.foodres.2010.11.025
24. Zhang, D., Wu, H., Xia, Z., Wang, C., Cai, J., Huang, Z., Du, L., Sun, P. y Xie, J. (2012). Partial characterization, antioxidant and antitumor activities of three sulfated polysaccharides purified from *Bullacta exarata*. *J. Funct. Foods*, 4, 784–792. doi: 10.1016/j.jff.2012.05.006

FABRICACIÓN DE TEJAS BIODEGRADABLES A BASE DE FIBRA DE COCO, COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN LA SUSTITUCIÓN DE TEJAS DE ORIGEN PLÁSTICO

Juana Deisy Santamaría Juárez[1*], Jocelyn Herrera Hernández [1], Héctor Toribio Cuaya[1], Evili Báez Castillo[2], Guillermo Santamaría Juárez[1]. Miguel Ángel Hernández Espinoza[1].

[1] Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av San Claudio s/n, Cd Universitaria, La Hacienda, 72592 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.
deisy.santamaria@correo.buap.mx

RESUMEN

Los productos fabricados con plásticos reciclados son una fuente potencial de microplásticos (MP)[1]. En la actualidad, se plantea que el reciclaje de estos materiales puede tener varias aplicaciones, como la producción de tejas plásticas. Si bien este tipo de productos ofrecen una alternativa para disminuir la acumulación de materiales contaminantes, no satisfacen completamente las necesidades de la población, ya que no son aptos para soportar condiciones ambientales y pueden seguir siendo una fuente de contaminación en el futuro. Por el contrario, el uso de bioplásticos representa una alternativa sustentable para sustituir los plásticos convencionales. Estos materiales podrían cubrir las mismas necesidades, reducir su impacto ambiental y disminuir el consumo de energético durante su elaboración[2]. El objetivo de este trabajo es fabricar un material composito que pueda utilizarse en la producción de tejas, utilizando un aglutinante[3] y fibra de coco (FC) como alternativa sostenible.

Se aplicó un diseño factorial completo 2^k (k=2) para elaborar un aglutinante. Se utilizó FC (tamizada y seleccionada con base a su tamaño de partícula), para brindar estructura a la teja. Se elaboraron placas utilizando el método de vaciado a temperatura ambiente. Se evaluó la absorción de agua, la tensión superficial como variables de respuesta y su hidrofobicidad.

Las pruebas de hinchamiento muestran que estos absorben de un 45 a 125%. Con una pérdida de peso del 10 al 20%. Las pruebas de tensión superficial determinaron que dos formulaciones presentaron un mayor grado de hidrofobicidad y estos están en función de la composición del aglutinante. Con base en los resultados se puede concluir que el material aglutinante, biopolímero, es una opción viable para fabricar un composito hidrofóbico que cambia su arreglo estructural después de un proceso de absorción y secado del material. Estas características físicas permiten establecer un material base como una opción prometedora para fabricar productos como tejas más sustentables en comparación con los materiales plásticos a pesar de que estos provengan de un proceso de reciclado.

INTRODUCCIÓN

El uso excesivo del plástico ha impactado de manera negativa al medio ambiente, que, desde la década de 1950, el consumo y la producción de este material ha ido incrementando exponencialmente con el paso del tiempo. Actualmente, se generan aproximadamente 400 millones de toneladas de residuos plásticos al año. La producción de plástico es perjudicial para el planeta, dado que requiere de un alto consumo de energía y se emiten grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera. Gran parte de los plásticos producidos acaban en los ecosistemas terrestres y acuáticos perdurando hasta que son degradados por el ambiente, si es que esto llega a ser posible.

En consecuencia, se ha promovido el reciclaje de residuos plásticos. Sin embargo, a pesar de que se han reutilizado desechos plásticos para generar nuevos productos, como muebles, botellas de detergentes, contenedores, tejas, etc., los productos finales a veces no son tan convincentes o presentan inconvenientes a lo largo de su uso. Ante esta problemática los bioplásticos[4] se consideran una alternativa sostenible debido “a que a partir de productos vegetales (maíz, papa, soja o residuos agrícolas) se crean materiales similares al plástico, pero que son capaces de degradarse con agua

o de manera natural, además de producirse con menor consumo de energía y sin generar un impacto ambiental significativo" [2].

Los compositos[5] son materiales compuestos hechos a partir de más de un componente, los materiales con los que se realizan pueden estar en estado líquido o sólido al inicio, sin embargo, el producto final siempre se obtiene en estado sólido. En la presente investigación, se elaboraron compositos constituidos principalmente de un bioplástico y fibra de coco (FC), cuya formulación da origen a un material que puede servir como base para fabricar tejas biodegradables ofreciendo así una alternativa sostenible para reemplazar tejas de origen plástico.

TEORÍA

Impacto ambiental del plástico convencional.

En la actualidad la mayoría de los productos que se consumen y que rodean día a día a la población están hechos de plástico, desde el calzado hasta contenedores de alimentos como botellas. Debido a que resulta tan común utilizar los plásticos, la sociedad no es su consciente para del riesgo que implica seguir utilizando este material día a día. Actualmente se estima que la producción de plásticos ronda entre los 400 – 430 millones de toneladas por año a nivel mundial. Sin embargo, la infraestructura de reciclaje y gestión de residuos no ha avanzado al mismo ritmo. Se calcula que solo alrededor del 9% de los residuos plásticos se reciclan, mientras que más del 80% termina acumulándose en vertederos o en entornos naturales, incluyendo océanos[6]. Esto implica que la gran mayoría de los plásticos de un solo uso y otros desechos plásticos persisten en el ambiente durante décadas o siglos.

El uso de los plásticos no solo implica consecuencias como el aumento de basura, también conlleva el desgaste ambiental debido a su lenta degradación, así pues, a pesar de que un plástico comience a degradarse no lo hace por completo y da origen a los MP que pueden ser aun mas dañinos pues al ser tan pequeños llegan a contaminar suelos, ríos y mares. Aproximadamente 51 billones de partículas MP flotan actualmente en los océanos del mundo[7], donde son extremadamente difíciles de limpiar.

De los problemas antes mencionados uno que ha preocupado demasiado es el daño que miles de animales marinos sufren debido a la ingestión o enredos en los residuos plásticos ya que se ha registrado que tan solo en un año mueren más de un millón de aves marinas por la contaminación de plástico. Además, los MP pueden entrar en la cadena alimentaria y han sido hallados incluso en el agua potable y tejidos humanos, lo que plantea riesgos aún no totalmente comprendidos para la salud pública[8].

El hecho de que haya contaminación no es el único problema que engloba el uso de plástico, también el cambio climático es una consecuencia importante y que aqueja a todos y no solo por el desecho de este material, desde su fabricación se necesita mucha energía durante el proceso ya que al ser un derivado de los combustibles fósiles como el petróleo para que pueda transformarse en plástico se necesitan grandes cantidades de calor y de esta misma forma se liberan grandes cantidades de CO_2. En 2019 se registró la cantidad de 1.8 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por los plásticos. Asimismo, la acumulación de plásticos en los vertederos genera metano y otros gases nocivos a largo plazo[9].

Estos problemas evidencian la urgencia de buscar alternativas sostenibles a los plásticos tradicionales. Si bien el reciclaje es una estrategia útil, su eficacia es limitada (menos del 10% de reciclaje global) y no detiene la generación continua de residuos. En este contexto surgen los bioplásticos y materiales biodegradables como posibles soluciones para reducir la carga contaminante y la dependencia de recursos no renovables. A continuación, se examinan las características de estos materiales emergentes y su potencial para aplicaciones como la fabricación de tejas ecológicas.

Composición, propiedades y clasificación de los bioplásticos.
Los bioplásticos son materiales que se caracterizan por ser semejantes a los plásticos con la diferencia que son bio-basados, es decir son de origen biológico, de igual forma pueden ser biodegradables a partir de ciertas condiciones naturales, pueden tener alguna de estas características o ambas. Pero no se puede confundir el termino bio-basado con biodegradable, debido a que el material en cuestión puede estar conformado por biomasa mas no significa que se pueda degradar fácilmente, de esta forma existen polímeros que están hechos a base de recursos fósiles y que, si son biodegradables, tomando esto en cuenta es que los bioplásticos se pueden catalogar de dos formas, la primera depende de su materia prima y la segunda de la capacidad del polímero para degradarse.

A continuación, se enlistan algunas de estas opciones:

- Bioplásticos bio-basados: son aquellos que provienen de recursos renovables extraídos directamente de la naturaleza como la biomasa vegetal o microbiana, específicamente algunas de las materias primas pueden ser el almidón, la celulosa y el ácido poli láctico (PLA, por sus siglas en ingles) e incluso se puede incluir a algunos poliésteres como el poliuretano y la poliamida bio-basada. Este tipo de materiales se puede utilizar para composta en ciertas condiciones controladas y su huella de carbono puede ser menor a comparación de otros materiales semejantes hechos con petróleo.

- Bioplásticos biodegradables de origen fósil: como lo dice su nombre son derivados del petróleo con la característica de ser biodegradables, un ejemplo de estos materiales son los poliésteres alifáticos. Y aunque la materia prima utilizada para su fabricación no es degradable estos se pueden descomponer utilizando microbios y bajo ciertas condiciones específicas, pero aun así siguen siendo una buena alternativa.

- Biopolímeros obtenidos por vía biotecnológica: este tipo de polímeros se producen a partir de organismos vivos, en su mayoría por los microorganismos, un ejemplo son los polihidroxialcanoatos (PHA) que se obtiene a partir de ciertas bacterias. Una de las grandes ventajas es que estos polímeros son tanto bio-basados como biodegradables y esto les permite poder desgastarse y reincorporarse a la naturaleza en escasos meses lamentablemente su fabricación aun implica varios retos tecnológicos.

Los bioplásticos son una gran alternativa para comenzar a suplir el plástico convencional por opciones que permitan disfrutar de los mismos beneficios que ofrece un polímero común, pero con la ventaja de que el planeta y los seres vivos no están pagando un precio con su salud y medio ambiente. Afortunadamente en la actualidad existen varios sectores en los que los bioplásticos se han ido incorporando poco a poco, por ejemplo, el PLA es uno de ellos, hoy en día es una de las materias primas en el sector de la impresión 3D e incluso ofrece una resistencia mecánica y rigidez similar a la del PET.

No obstante, se deben considerar posibles compensaciones: algunos bioplásticos podrían implicar impactos indirectos, como el uso de tierras agrícolas (competencia con la producción de alimentos) o requerir procesos industriales específicos para su degradación completa[10]. En general, el desarrollo de bioplásticos busca un balance donde se logre desempeño funcional adecuado con un ciclo de vida más sostenible que el de los plásticos convencionales.

Ventajas del uso de fibras naturales en composites bioplásticos (énfasis en fibra de coco).
Se ha buscado mejorar de diversas formas los bioplásticos, una de ellas es incorporar fibras naturales para reforzar estos materiales. Estas fibras provienen de plantas como yute, coco, cáñamo, algodón, entre otros, que en su mayoría se encuentran como desechos pues solo se aprovecha el fruto que envuelven y por ello se pueden conseguir a bajo costo y en grandes cantidades permitiendo disminuir desechos naturales y darles una segunda oportunidad donde se aprovechen otras propiedades.

En particular, la fibra de coco (FC), obtenida del mesocarpio o cáscara del fruto del coco (*Cocos nucifera*), destaca por su disponibilidad como residuo agroindustrial y sus propiedades únicas. Generalmente los subproductos del coco (cáscaras, estopa) son desechados como residuos; aprovecharlos en composites aporta valor agregado a un desecho y reduce la necesidad de fibras artificiales[11]. Las principales características de esta fibra es su alto contenido de lignina (del 40 al 45%) que le otorga mayor rigidez y resistencia a comparación de otras fibras naturales, además de contener celulosa y hemicelulosa.

Otro beneficio de la FC es que al tener mayor rigidez y resistencia no se desgasta fácilmente y su hidrofobicidad es baja lo que le confiere la facilidad de adaptarse y ser una muy buena opción en ambientes húmedos. Debido a que no absorben fácilmente el agua no permiten la formación de bacterias o moho lo que permite su durabilidad a lo largo del tiempo. Adicionalmente, actúan como aislante térmico y acústico; por ejemplo, un composite con fibra de coco puede ofrecer cierta absorción de sonido y estabilidad a temperaturas moderadas mejor que los polímeros solos[12].

Al contemplar las propiedades mencionadas es que la FC proporciona propiedades mecánicas, térmicas y físicas que mejoran a los bioplásticos permitiendo que asemejen sus propiedades físicas y mecánicas a los polímeros convencionales. Un caso documentado es la fabricación optimizada de paneles constructivos con ~10% de fibra de coco, que lograron desempeño satisfactorio como tejas para techado al combinar rigidez y baja densidad[13].

Al utilizar fibras naturales se reduce la necesidad de ocupar fibras minerales o sintéticas que además de contaminar implican un incremento del costo. Además, las FC integradas al bioplástico crea un material totalmente biodegradable que elimina el riesgo de producir residuos nocivos. La FC no perjudica la salud en comparación con otro tipo de fibras que actualmente se usan como la fibra de vidrio. Esto contrasta con varios compositos tradicionales que combinan polímeros no degradables con fibra de vidrio o carbono, dificultando su disposición final. En cambio, un biocomposito con fibra de coco podrá fragmentarse y ser asimilado por el medio ambiente a largo plazo, cerrando el ciclo de recursos naturales.

En resumen, la FC como refuerzo podría proporcionar al biocomposito una mejor resistencia mecánica, ligereza, bajo costo y menor impacto ambiental, convirtiéndolo en un material prometedor. Sus características de dureza y durabilidad la hacen especialmente atractiva para aplicaciones en las que se busca sustitución de plásticos convencionales por alternativas más sostenibles, tal como es el caso de las tejas biodegradables que se abordan en esta investigación.

Aplicaciones sostenibles de bioplásticos y biocompositos en la construcción.

La sociedad se ha podido desarrollar gracias a la construcción, desde la época de la prehistoria los humanos buscaban cuevas para utilizarlas como refugio y vivienda pues gracias a esto se podían proteger del clima y contra animales salvajes, así fue evolucionando la sociedad de la mano con la construcción y las civilizaciones posteriores como los egipcios y los sumerios dieron pie a nuevas formas de pensamiento dentro de ello innovando en la industria de la construcción siempre teniendo como prioridad satisfacer diversas necesidades dependiendo del contexto, optimizar los costos y recursos, garantizar la seguridad, cumplir con las normas y regulaciones y uno de los temas mas importantes en la actualidad, reducir el impacto ambiental.

Este último aspecto es uno de los que mas se toman en consideración hoy en día pues los materiales que se han utilizado a lo largo del tiempo para incorporarlos a las diversas edificaciones no han sido del todo amigables con el ambiente, por lo que los bioplásticos y los biocomposites han surgido como una alternativa prometedora para reemplazar a los materiales tradicionales en ciertas aplicaciones no estructurales.

A continuación, se mencionan algunas aplicaciones de estos nuevos materiales en la industria de la construcción:

- Paneles y tableros de construcción: en estos casos los bio-composites han servido para crear paneles tipo madera-plástico, falsos techos, muebles, etc. Por ejemplo, se han fabricado tableros hechos de resina bioplástica reforzada con fibra de lino o bagazo que se utilizan como paneles de divisiones interiores, fachadas y elementos no estructurales.

- Aislantes y rellenos de construcción: las alternativas bio-basadas también se pueden aplicar a aislantes y rellenos de construcción, de esta manera es que se han desarrollado paneles multicapa de fibra de coco impregnada con resina natural y que se utiliza como alternativa de paneles de aislamiento térmico y acústico, además la FC también es utilizada en mantas de aislamiento y como componente en sistemas de green roofs (techos verdes) debido a su retención de agua y aislamiento.

- Elementos decorativos: también los bioplásticos han sido utilizados en el ámbito artístico y decorativo pues sus propiedades permiten utilizarse en impresoras 3D y diversos métodos para fabricar piezas de bioplástico. Dentro de los productos hechos a base de estas técnicas se han fabricado baldosas decorativas, muebles, floreros, marcos, y muchos más productos, que en general se caracterizan por tener un menor peso y diseños complejos. Asimismo, en mobiliario urbano (bancas, papeleras) algunas ciudades están probando compuestos con base bioplástica reforzados con fibras recicladas, que al desgaste podrán degradarse en lugar de generar MP.

- Aplicaciones en techumbres: este es el tema más importante para el presente caso de estudio. Las tejas usualmente son hechas a base de caucho, concreto, arcilla y plástico reciclado. Sin embargo, en el último caso a pesar de que son una alternativa para disminuir la contaminación por el uso de PET y de tener diversas ventajas como impermeabilidad y fácil instalación tiene diversas limitaciones, ya que no soportan altas temperaturas y tampoco resisten estar a la intemperie por mucho tiempo y debido al material del que están hechas son susceptibles a la formación de goteras lo que limita su uso pues aunque tengan un menor costo de inversión su mantenimiento incrementa la inversión a largo plazo, pero el aspecto con mayor importancia es que en términos ambientales al estar hechas de plástico reciclado eventualmente liberan MP.

  Es así que como alternativa se investigan tejas de biocompositos donde un polímero biodegradable (por ejemplo, un biopolímero derivado de almidón o aceite vegetal) se combina con fibra natural (como fibra de coco, aserrín, cáñamo, etc.) para dar forma a una teja.

Si bien los bioplásticos y biocompositos aún se utilizan mayormente en empaques, su incursión en construcción va en aumento. Sus aplicaciones en elementos no estructurales (paneles, acabados, tejas, aislantes) son las más avanzadas, donde cumplen la función requerida a la vez que reducen la carga ambiental. Estudios de análisis de ciclo de vida indican que sustituir plásticos convencionales por bioplásticos en construcción puede disminuir las emisiones de CO_2 y la generación de residuos en un 80% para 2040, si se implementan ampliamente estas soluciones.

Tejas hechas de plástico.

Hoy en día casi todo lo que nos rodea contiene o está hecho de plástico, ropa, calzado, accesorios, embalaje, utensilios de cocina y la lista es casi infinita, e incluso el uso de este material ha llegado hasta el ámbito de la construcción pues ahora esta presente hasta en los techos de las casas o establecimientos pues actualmente se producen tejas hechas de PVC, plástico y plástico reciclado. Los techos de PVC representan una alternativa a los hechos de lámina debido a que, son impermeables, duraderos pues no sufren corrosión ni oxidación por el contrario de los techos de lámina y sobre todo son estéticos, que es un aspecto importante en la industria de la construcción y sobre todo en estos días.

Sin embargo, no todo es ideal pues tienen puntos débiles como la baja resistencia al calor extremo y debido al cambio climático el incremento en las olas de calor en los últimos años tiene un efecto negativo sobre la estabilidad estructural porque estos se expanden y contraen dependiendo de la temperatura a la que es sometido, este último aspecto juega un papel importante debido a que permitiría la formación de goteras y deformaciones que complicaría su utilidad a lo largo del tiempo y aunque al comienzo puede implicar un gasto menor a largo plazo por su mantenimiento incrementa la inversión y suele ser mayor en comparación a otros materiales.

Otra variante de este tipo de productos es denominada "Plastiteja"[14] que como se menciono anteriormente uno de sus principales atributos es la estética pues su aspecto es agradable a la vista y por ello es considerada como una buena opción pues asemeja una teja de barro sin la complejidad de instalación que implica esta última. Además, también es considerada como una excelente alternativa en comparación con los techos convencionales de lamina debido a que tiene un espesor de 5 a 6 milímetros y debido al material del que esta hecha reduce el ruido en temporada de lluvias y resulta más resistente en comparación con otras laminas**,** de igual forma gracias a su espesor es que no es una lamina delicada y por ello no se rompe con facilidad.

A la vez se han desarrollado tejas plásticas provenientes de plástico reciclado, las cuales están hechas de PET (Polietileno tereftalato) en respuesta a la necesidad de disminuir el impacto ambiental por la gran producción y desecho de botellas y productos para comida hechos con este material. Los residuos de PET se encuentran sucios antes de ser reciclados, así que se deben de someter a métodos de limpieza y procedimientos mecánicos y químicos especiales que permitan recuperar su pureza y calidad originales para poder ser reutilizados.

En todos los casos a pesar de tener ventajas como la impermeabilidad y ligereza a comparación de productos similares en el mercado siguen teniendo limitaciones y problemas como la formación de goteras, el uso de métodos de limpieza complejos, el desgaste y los cambios de propiedades al someterse a altas temperaturas, además de ser dependientes de los productos derivados del petróleo[15]. Debido a estas razones resulta importante desarrollar la tecnología que permita el uso de bioplásticos y biocompositos como una opción para la mejora en el área de la construcción mediante el uso una fibra natural que permita obtener materiales resistentes, biodegradables y que cumplan con las características físicas y mecánicas de las tejas convencionales sin necesidad de comprometer el ambiente y la salud.

PARTE EXPERIMENTAL

Previo a realizar el diseño de experimentos, se determinó el tamaño de partícula de la FC, debido a que este influye en la estructura de la teja. Para llevar a cabo esta determinación, se utilizó el método de cuarteo, se hicieron 4 cuarteos para obtener un total de 16 muestras y de los cuales se eligieron aleatoriamente 8 fracciones (Figura 1).

Figura 1. Método de cuarteo. Se aplicaron 4 cuarteos.

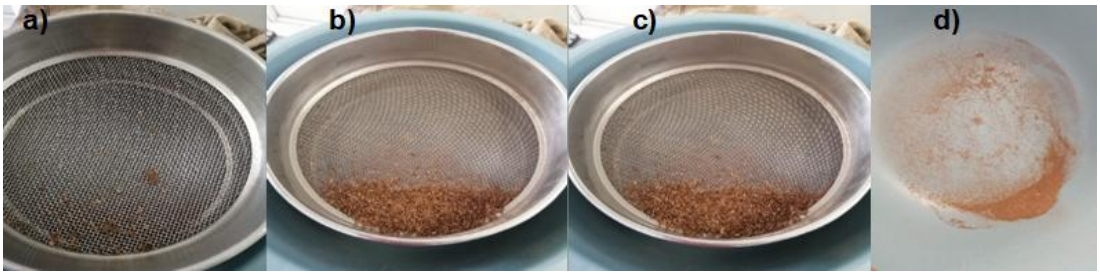


Figura 2. Tamaños de partícula: a) 10>, b)20>, c)100>, d) <100

Posteriormente cada fracción fue tamizada y pesada, se ocuparon tres tamices (malla #10, #20 y #100) y como resultado se obtuvieron cuatro tamaños de partícula (Figura 2): > 2 mm, < 2 mm - > 0.85 mm, < 0.85 mm - > 0.15 mm y < 0.15 mm. Una vez obtenidos los cuatro tamaños de partícula se eligieron los tamaños de partícula correspondientes a <100 y 100> porque se buscó tener la mayor población de las partículas con tamaño semejante para interactuar de misma manera con el aglutinante.

Diseño de experimentos para la fabricación del aglutinante.

Después de que se determinó el tamaño de partícula se elaboró un diseño de experimentos factorial completo 2^k (k = 2) para preparar un aglutinante, variando la cantidad de bórax y lignina (factores) que funcionan como agentes entrecruzantes, para elaborar cinco experimentos en total, uno de ellos sirvió como control. En la Tabla 1, se indica como se varió la cantidad de agua en cada formulación con el objetivo de mantener el mismo porcentaje de sólidos (85.30%) y líquidos (14.69%).

Tabla 1. Diseño de experimentos factorial.

ento	Bórax (g)	Lignina (g)	Cantidad de ag (mL)
	1.20	0.20	139.39(
	1.20	0.61	138.983
	3.60	0.20	136.992
	3.60	0.61	136.585

Para elaborar las formulaciones de cada composito, se siguió el siguiente procedimiento: primero se calentó agua hasta alcanzar una temperatura aproximada de 70 - 80°C. Inmediatamente, se preparó una suspensión de almidón de papa en agua fría, mezclándose hasta suspender completamente el material. Después se agregó esta mezcla al agua caliente y se agitó con un agitador eléctrico equipado con una propela tipo ancla a 150 rpm. El almidón remanente que queda en el vaso de precipitados se acarreó con 10 mL de agua y se mantuvo la agitación en el sistema por 5 minutos hasta que el almidón gelificó, en este momento se añade el glicerol disuelto en 7.5 mL de agua agitando por otros 5 minutos.

Transcurrido este tiempo de mezclado se integran la cantidad necesaria de solución de lignina (0.04 g/mL, pH ≈ 13) y deja interactuar por otros 5 minutos. Previamente se realiza una solución de bórax con 50 mL de agua que se calienta y mezcla con un agitador magnético hasta disolver por completo la sal. Después de mezclar la lignina por 5 minutos se adiciona la solución de bórax y se deja

reaccionar por 5 minutos más. Por último, se agregó la FC al hidrogel y se dejó de mezclar hasta que se observó que la mezcla presentó una dispersión completa.

Una vez obtenida la mezcla del composito se colocaron 15 g de este material en placas de acrílico de 5 cm de ancho por 12.8 cm de largo y un grosor de 0.3 cm recubiertas en la base con una película antiadherente. Con una espátula de plástico se extendió el material hasta llenar los bordes del molde y por último se le dieron unos golpes contra la mesa para eliminar burbujas. Finalmente, los compositos se dejaron secar a temperatura ambiente y bajo la sombra durante 20 horas.

Pruebas de hinchamiento por absorción de agua.
La prueba consistió en tomar 0.2 g de muestra de cada experimento y se colocó el material dentro de vaso de precipitados con 60 mL de agua para que cubriera por completo la superficie de cada muestra y se dejó dentro por 40 minutos, posteriormente se volvió a pesar cada segmento de material para conocer la cantidad de agua que absorbió. Estas pruebas se realizaron por duplicado. Los resultados se presentan como porcentaje.

Prueba de tensión superficial.
La prueba de tensión superficial consiste en agregar una gota de agua a un segmento de cada placa de composito, con la ayuda de un transportador y una cámara digital se determinó el ángulo que formaba la gota con respecto al material. Se determinó el ángulo de la gota tanto para la parte superior e inferior de cada trozo de material, para así determinar que material es hidrofóbico y en qué superficie.

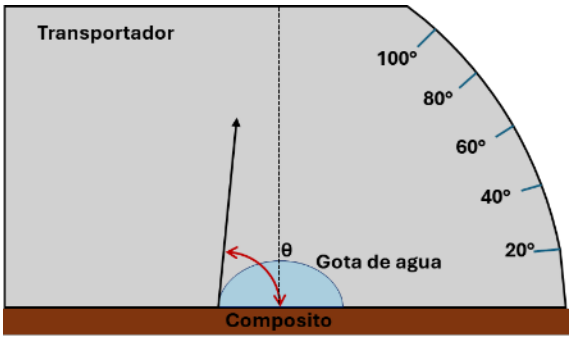


Figura 3. Determinación de ángulo de contacto de la gota de agua sobre la superficie del composito utilizando un transportador.

Observación de los compositos mediante un microscopio digital.
Se utilizó un microscopio digital con un enfoque de 1000X para tomar fotografías de los segmentos del composito de cada experimento antes, durante y después de haber realizado las pruebas de hinchamiento para observar de manera cualitativa la forma en que se acomodaron la FC y el hidrogel.

RESULTADOS

Tamaño de partícula.
A partir de la selección de los tamaños de partícula del proceso de cribado se tabularon los porcentajes de cada resultado y se calcularon los promedios y desviaciones estándar correspondientes. La Tabla 2 presenta la distribución de tamaño de partícula observando que la mayor población se encuentra en el intervalo de < 0.85 mm a > 0.15 mm y es del 58.05 ± 4.16%.

Tabla 2. Tamaño de partícula.

a	Tamaño de partícula	Promedio	±	Des
	>2 mm	4.16	±	
	<2 mm - >0.85 mm	22.15	±	
>	<0.85 mm - > 0.15 mm	58.05	±	

Pruebas de hinchamiento por absorción de agua.

A cada composito se le cortaron dos trozos con el mismo peso, ambos fueron sometidos a la misma prueba para realizar una comparación, se registraron los pesos de antes de realizar las pruebas y los pesos una vez terminado el tiempo de residencia, con dichos resultados se calculó el porcentaje y la desviación estándar correspondientes. Las Tablas 3 y 4 resumen los promedios de la primera prueba de hinchamiento, donde se logra observar una disminución en el peso de las muestras transcurrido un día después de haber hecho las pruebas de hinchamiento y haberse secado a condiciones ambiente.

Tabla 3. Primera prueba de hinchamiento, la evaluación se hizo por duplicado.

Experimento	Peso al inicio (g)		Peso después (g)		Porcentaje		Promedio	±	Desviación
Control	0.205	0.200	0.603	0.605	194.15	202.50	198.32	±	5.91
P1	0.203	0.206	0.492	0.510	142.36	147.57	144.97	±	3.68
P2	0.205	0.203	0.491	0.517	139.51	154.68	147.10	±	10.73
P3	0.204	0.205	0.630	0.622	208.82	203.41	206.12	±	3.82
P4	0.204	0.203	0.589	0.745	188.73	267.00	227.86	±	55.34

Tabla 4. Pérdida de peso después de la primera prueba de hinchamiento, la evaluación se hizo por duplicado.

Experimento	Peso al inicio (g)		Peso un día después (g)		Porcentaje		Promedio	±	Desviación
Control	0.205	0.200	0.178	0.165	13.17	17.50	15.34	±	3.06
P1	0.203	0.206	0.182	0.181	10.34	12.14	11.24	±	1.27
P2	0.205	0.203	0.178	0.179	13.17	11.82	12.50	±	0.95
P3	0.204	0.205	0.173	0.173	15.20	15.61	15.40	±	0.29
P4	0.204	0.203	0.178	0.160	12.75	21.18	16.96	±	5.97

Las Tablas 5 y 6 resumen los promedios al término de una segunda prueba de hinchamiento, se logra observar nuevamente una disminución en el peso después de la segunda prueba y también se observa que las muestras absorbieron menos agua en comparación de la primera prueba.

Tabla 5. Segunda prueba de hinchamiento, la evaluación se hizo por duplicado.

Experimento	Peso al inicio (g)		Peso después (g)		Porcentaje		Promedio	±	Desviación
Control	0.205	0.200	0.582	0.549	183.90	174.50	179.20	±	6.65
P1	0.203	0.206	0.463	0.484	128.08	134.95	131.52	±	4.86
P2	0.205	0.203	0.478	0.481	133.17	136.95	135.06	±	2.67
P3	0.204	0.205	0.465	0.526	127.94	156.59	142.26	±	20.25
P4	0.204	0.203	0.580	0.653	184.31	221.67	202.99	±	26.42

Tabla 6. Pérdida de peso después de las pruebas de hinchamiento, la evaluación se hizo por duplicado.

Experimento	Peso al inicio (g)		Peso un día después (g)		Porcentaje		Promedio	±	Desviación
Control	0.205	0.200	0.171	0.153	16.59	23.50	20.04	±	4.88
P1	0.203	0.206	0.174	0.175	14.29	15.05	14.67	±	0.53
P2	0.205	0.203	0.178	0.135	13.17	33.50	23.33	±	14.37
P3	0.204	0.205	0.169	0.123	17.16	40.00	28.58	±	16.15
P4	0.204	0.203	0.161	0.145	21.08	28.57	24.82	±	5.29

Pruebas de tensión superficial.
Una vez determinados los ángulos superior e inferior de cada experimento se hizo un compendio de resultados en la Tabla 7. En esta tabla se comparan los ángulos superior e inferior de las superficies de los biocompositos, P1 presento el mayor ángulo de contacto en ambas superficies y P2 tiene el mayor ángulo de contacto en la superficie inferior lo que permite considerar que ambas pruebas son las más hidrófobas del diseño de experimentos.

Estas formulaciones tienen el nivel bajo del bórax lo que permite considerar que al aumentar este material este otorga un carácter más hidrofílico a los compositos. Para el caso de la lignina en la formulación P1 y P2 se tiene el nivel bajo y alto del diseño y comparando con el experimento control es claro que este ofrece mayor hidrofobicidad a estos materiales. Sin embargo, la interacción más favorable considerando el carácter hidrofóbico del biocomposito se da cuanto se tiene el nivel bajo en ambos agentes entrecruzantes debido posiblemente a la interacción de estos en la estructura del aglutinante y su interacción con la FC.

Tabla 7. Pruebas de tensión superficial.

Experimento	Ángulo por arriba	Ángulo por abajo
Control	62.5	46.0
P1	78.0	62.5
P2	47.0	79.0
P3	47.5	51.0
P4	45.0	62.0

Imágenes de los compositos mediante el microscopio digital
Las Figuras 4 a 7 muestran las imágenes de los compositos antes y después de aplicar la prueba de hinchamiento por dos ocasiones. Se observó que los materiales secos presentan un brillo característico del aglutinante que cubre como película a la FC, pero cuando los compositos se encontraban húmedos se pierde este brillo y se logran observar zonas donde la película de aglutinante se ve hinchada y opaca. Además, se observó que las fibras se separan cuando el material este húmedo (Figura 5 y 7) y cuando se seca su estructura se compacta (Figura 6). Esto es congruente con el comportamiento que se observó durante la prueba de hinchamiento, es decir, después de esta prueba el peso del composito disminuye debido posiblemente a la perdida de agua y el reacomodo de la estructura del material entre el FC y el aglutinante.

Figura 4. Material visualizado en el microscopio. Fotos antes de las pruebas de hinchamiento: a) control, b) P1, c) P3, d) P4.

Figura 5. Material visualizado en el microscopio. Fotos después de las pruebas de hinchamiento: a) control, b) P1, c) P2, d) P3, e) P4.

Figura 6. Material visualizado en el microscopio. Fotos antes de la segunda prueba de hinchamiento: a) control, b) P1, c) P2, d) P3, e) P4.

Figura 7. Material visualizado en el microscopio. Fotos después de la segunda prueba de hinchamiento: a) control, b) P1, c) P2, d) P3, e) P4.

Determinación del costo a nivel laboratorio

El costo de fabricación a nivel laboratorio se realizó a partir de las cantidades utilizados para fabricar una película de 64 cm^2 y 0.3 cm de ancho tomando en cuenta la formulación del control. Los precios fueron recopilados de agua de Puebla, Droguería cosmopolita S.A. de C.V. y COCISA México. Se obtuvo el precio total por cm^2 de material producido con un grosor de 0.3 cm (Tabla 8).

Tabla 8. Costos de materia prima de la formulación control.

Componente	Gramos	Precio
Almidón de papa	15.15	$1.348
Bórax	2.40	$0.122
Lignina	0.41	$0.023
Glicerina	5.82	$0.270
Fibra de coco	17.00	$4.323
Agua	137.5	$0.011
TOTAL		$6.097

Costo por cm^2	$0.095

CONCLUSIONES

- La formulación P1 y P2 son los biocompositos más hidrofóbicos de acuerdo con los resultados de ángulo de contacto, estos tienen el nivel de los agentes entrecruzantes en su nivel bajo, lo que permite asegurar que el bórax otorga un carácter más hidrofílico al aglutinante, pero al contrario la lignina ofrece mayor hidrofobicidad al material. Sin embargo, resulta importante considerar la interacción entre ambos agentes en el aglutinante y su interacción con la FC. Ambas formulaciones pueden funcionar como base para fabricar tejas biodegradables pero se requiere realizar más estudios a nivel molecular para identificar la interacción del biopolímero, almidón, con los agentes entrecruzantes.
- Con base a las pruebas de hinchamiento y las imágenes del material con el microscopio digital se observó que existe un nuevo arreglo en los compositos que permite que se compacte su estructura lo que afecta en su peso después de secar los materiales lo que se verifico por dos ocasiones. Para tener mayor certeza sobre este fenómeno se propone realizar las mismas pruebas, pero con muestras que tengan un área definida (1 cm^2, 4 cm^2, etc.) y grosor conocido para comprobar si no solo se pierde peso sino también se reduce el área o el volumen. Pero cualitativamente gracias a las fotografías del material húmedo y seco se puede argumentar que existió un reacomodo del composito.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Giustozzi, F., & Enfrin, M. (2021). Use of Recycled Plastic Materials in Roads and their Potential for Microplastics Release. AIJR Abstracts, 1-4. https://books.aijr.org/index.php/press/catalog/book/119/chapter/1233

[2] Hita, P. (2020, July 9). El crecimiento de la producción y demanda de bioplásticos. - Plasticos Hita. Plasticos Hita. https://www.plasticoshita.com/noticias/el-crecimiento-de-la-produccion-y-demanda-de-bioplasticos/

[3] YG-1. (s.f.). What is the nature and function of the crosslinking agent? YG-1. Recuperado el 7 de octubre de 2024, de https://es.yg-1.com/news/what-is-the-nature-and-function-of-the-crosslinking-agent.html

[4] Fundación Argentina de Nanotecnología. (2021, May 19). Los bioplásticos, una alternativa sustentable - Fundacion Argentina de Nanotecnologia. Fundacion Argentina De Nanotecnologia. https://www.fan.org.ar/noticias/los-bioplasticos-una-alternativa-sustentable/

[5] Compositos. (n.d.). Sociedad Mexicana De Física. https://smf.mx/division/materia-condesada-y-nanotecnologia-esp/lineas-de-investigacion-esp/compositos-esp/

[6] Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: Challenges and Opportunities to Mitigate pollution and Effective management. *International Journal of Environmental Research*, *17*(1). https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z

[7] G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: Challenges and Opportunities to Mitigate pollution and Effective management. *International Journal of Environmental Research*, *17*(1). https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z

[8] Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. Ambio, 51(3), 518-530. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9

[9] Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: Challenges and Opportunities to Mitigate pollution and Effective management. *International Journal of Environmental Research*, *17*(1). https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z

[10] Rosenboom, J., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, *7*(2), 117–137. https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8

[11] Hasan, K. M. F., Horváth, P. G., Bak, M., & Alpár, T. (2021). A state-of-the-art review on coir fiber-reinforced biocomposites. *RSC Advances*, *11*(18), 10548–10571. https://doi.org/10.1039/d1ra00231g

[12] Mulana, F., Aulia, M. P., Azwar, N., & Aprilia, S. (2024). Coconut fiber and fly ash polymer hybrid composite treated silane coupling agent: Study on morphology, physical, mechanical, and thermal

properties. *South African Journal of Chemical Engineering*, *50*, 10–19. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.07.008
[13] Hasan, K. M. F., Horváth, P. G., Bak, M., & Alpár, T. (2021). A state-of-the-art review on coir fiber-reinforced biocomposites. *RSC Advances*, *11*(18), 10548–10571. https://doi.org/10.1039/d1ra00231g
[14] Gacerosc. (2024, February 8). *Ventajas y desventajas de la lámina plasti teja que deberías conocer*. 3G Aceros. https://3gaceros.com/ventajas-y-desventajas-de-la-lamina-plasti-teja/?srsltid=AfmBOopXgvNXzWb8DWkMROcgs-uPFzAokwPWSA1IVTNSVMfK65GVnyYa
[15] Brangham, W., Baldwin, L., & Zahn, H. (2023, May 28). The UN wants to drastically reduce plastic pollution by 2040. Here's how. *PBS News*. https://www.pbs.org/newshour/show/the-un-wants-to-drastically-reduce-plastic-pollution-by-2040-heres-how

CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA Y FUNCIONAL DE LOS PÉPTIDOS OBTENIDOS MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA SOBRE LAS PROTEÍNAS DEL GRANO DE AMARANTO

Jocelyn Trujillo-Medel, Fátima Milagros Pérez-Aguirre, Luis Ángel Xoca-Orozco y Raúl Reyes-Bautista*

Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón
*raul.rb@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) es un pseudocereal con alto contenido proteico (16–20%) y potencial como fuente de péptidos bioactivos. En este estudio, se obtuvieron hidrolizados proteicos mediante hidrólisis enzimática con alcalasa, y se evaluaron sus propiedades antioxidantes, antihipertensivas e hipoglucemiantes. Las proteínas del grano fueron extraídas según su solubilidad y cuantificadas por el método de Bradford. El grado de hidrólisis se determinó mediante grupos amino libres (TNBS), alcanzando un 72.12 ± 4.63% tras 24 h de digestión. La purificación parcial se realizó por cromatografía en gel (Sephadex G-10), identificándose tres fracciones, siendo P-III (MM = 0.74 kDa) la más activa. Esta fracción presentó inhibición del 42% para la ECA y 28% para la DPP-IV, con valores de IC_{50} de 0.21 ± 0.01 mg/mL y 1.24 ± 0.1 mg/mL, respectivamente. La actividad antioxidante evaluada por DPPH, ABTS y FRAP mostró IC_{50} de 5.45, 7.84 y 3.57 mg/mL, respectivamente. Los resultados respaldan el potencial funcional de los hidrolizados de amaranto, destacando su aplicación en el desarrollo de ingredientes bioactivos para la industria alimentaria o nutracéutica.

INTRODUCCIÓN

El amaranto es una planta dicotiledónea no gramínea por lo que pertenece al grupo de los pseudocereales. Estas plantas producen semillas que se utilizan para elaborar principalmente harinas. En la actualidad, ha ganado popularidad entre los consumidores debido a sus posibles propiedades medicinales y con notables propiedades nutracéuticas.

El amaranto es considerado un alimento funcional debido a su alta densidad nutricional y la presencia de compuestos bioactivos que pueden contribuir a la prevención de diversas enfermedades, se han llevado a cabo diversos estudios sobre el valor nutricional y funcional de los diferentes compuestos del grano de amaranto. Entre las propiedades más notables se destaca su alto contenido proteínico, estas proteínas no contribuyen a intolerancias o reacciones alérgicas en personas con enfermedad celíaca o intolerancia al gluten debido a que es libre de gluten.

Además, dentro de la diversidad de compontes encontrados en el amaranto existen algunos que son importantes en la reducción de colesterol, ya que contiene fibras de tipo dietéticas, escualeno, tocotienoles, isoprenoides y otros factores.

Por otra parte, el amaranto contiene compuestos fenólicos, escualeno y tocoferoles, que actúan como antioxidantes naturales, ayudando a combatir el estrés oxidativo y reduciendo el riesgo de enfermedades crónicas como el cáncer y enfermedades cardiovasculares.

Los efectos hipotensores del amaranto han sido estudiados a nivel de proteínas purificadas del grano, así como utilizando preparados del grano completo. Se ha propuesto que algunas globulinas provenientes del grano de amaranto tienen la capacidad de inhibir la enzima convertidora de Angiotensina I (ECA) involucrada en la hipertensión arterial *[1]*. Por otra parte, a partir de fracciones proteínicas del grano de amaranto, se han obtenido varios péptidos con actividad inhibidora de la enzima dipeptidil peptidasa IV (DPP-IV) la cual interactúa en el mecanismo de regulación de la glucosa, los péptidos biológicamente activos (PBAs) con efecto hipoglucémico. Por lo tanto, el grano de amaranto y la obtención de péptidos bioactivos mediante la hidrolisis enzimática ha sido objeto

de estudio del presente trabajo, así como también la evaluación de sus actividades antioxidantes, hipoglucemiantes y antihipertensivas.

TEORÍA

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) es un pseudocereal que pertenece a la familia Amaranthaceae, constituida por aproximadamente 70 géneros, de los cuales, el género *Amaranthus* comprende alrededor de 60 especies, siendo solo tres las que se cultivan para la producción de semillas comestibles: *A. hypochondriacus* L. (México), *A. cruentus* L. (Centroamérica) y *A. caudatus* L. (Sudamérica, principalmente en Perú y Ecuador) *[2]*. Los péptidos bioactivos (BAP) son biomoléculas derivadas de proteínas específicas compuestas por dos y hasta 30 aminoácidos, y son el producto de hidrolisis de las enzimas digestivas como pepsina, tripsina y quimiotripsina.

Los BAP se consideran la nueva generación de reguladores biológicamente activos, estos péptidos encontrados en los pseudocereales como el amaranto presentan diversas actividades farmacológicas y estos pueden prevenir la oxidación y la degradación microbiana en los alimentos *[3]* además de ser utilizados como coadyuvantes en el tratamiento de diversos desordenes metabólicos que desencadenan enfermedades crónico-degenerativas, aumentando así la calidad de vida.

Se ha reportado sobre los hallazgos in vitro e in vivo que los péptidos derivados de proteínas dietéticas exhiben una significativa actividad antioxidante, la cual puede ejercer efectos notablemente beneficiosos en la promoción de la salud humana y en el procesamiento de alimentos. *Amaranthus caudatus* se ha posicionado entre las cinco principales plantas vegetales con poder antioxidante. Además, se ha determinado que la actividad antioxidante aumenta con la degradación proteolítica (péptidos menores de 5 kDa), es decir a mayor fraccionamiento proteico mayor actividad antioxidante [4].

La actividad antidiabética es uno de los efectos más prometedores de los péptidos obtenidos del grano de amaranto, se han realizado estudios in vivo e in vitro donde se demuestra una inhibición significativa de la DPP-IV (dipeptidil peptidasa IV). Esta en una enzima que degrada las incretinas (GLP-1 y GIP). En estudios in vitro, se han obtenido valores de IC_{50} comparables a compuestos sintéticos utilizados en fármacos como las gliptinas. Por tanto, los BAP figuran como una alternativa para el tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2.

La hidrólisis enzimática es uno de los métodos más utilizados para liberar péptidos de la estructura primaria de las proteínas. Este proceso puede realizarse utilizando una única enzima o mediante secuencias de hidrólisis con múltiples enzimas *[5].* El objetivo de utilizar múltiples enzimas es generar una mayor cantidad péptidos con diversas características que pueden exhibir diferentes actividades biológicas de interés, ampliando así el potencial funcional y nutracéutico de las proteínas hidrolizadas.

Una de las enzimas más utilizadas reconocidas por su eficiencia en este proceso de hidrolisis es la alcalasa teniendo la capacidad de producir péptidos hidrofóbicos a pH's alcalinos.

PARTE EXPERIMENTAL

Los granos de amaranto se sometieron a una molienda y se extrajo el contenido de grasa presente en la harina de amaranto sometiéndola en agitación constante con acetona industrial, posteriormente las proteínas del grano de amaranto se extrajeron de acuerdo con su solubilidad [6] utilizando Na2SO4 al 5% p/v, la proteína solubilizada se precipitó utilizando (NH4)2SO4 al 50% y 85% de saturación, mediante "salting out"

El contenido de proteína se evaluó por el método de Bradford. La hidrólisis de Alb1, Glo y Glu se llevó a cabo con la enzima proteasa *de Bacillus licheniformis* (alcalasa) (2.4 UA/L) en una relación E/S de 1.2 UA/g con un tiempo de 24 h de digestión enzimática, inactivando la enzima mediante la

adición de PMSF (2 mg/mL en etanol). Se determinó el grado de hidrólisis mediante la cuantificación de grupos amino libres con TNBS. Se realizó la purificación parcial de los hidrolizados mediante cromatografía de filtración en gel (Sephadex G-10). . Se realizó un análisis electroforético en geles de poliacrilamida con SDS-PAGE bajo condiciones desnaturalizantes. La actividad antidiabética y antihipertensiva se evaluó in vitro mediante la inhibición de las enzimas DPP-IV y ECA [7], respectivamente. Además, se determinó la capacidad antioxidante por métodos DPPH, ABTS y FRAP.

RESULTADOS

Los resultados mostraron que por efecto de la proteólisis, se encontró que la fracción proteínica disminuyó a 3.5 ± 0.14 mg/mL, alcanzando un grado máximo de hidrólisis de 72.12 ± 4.63 % ($p < 0.05$) a las 24 h.

Se puede observar en el perfil electroforético mostrado en la figura 1 que la proteína nativa tiene pesos moleculares altos, a partir de las 4 horas se observa una disminución de las bandas.

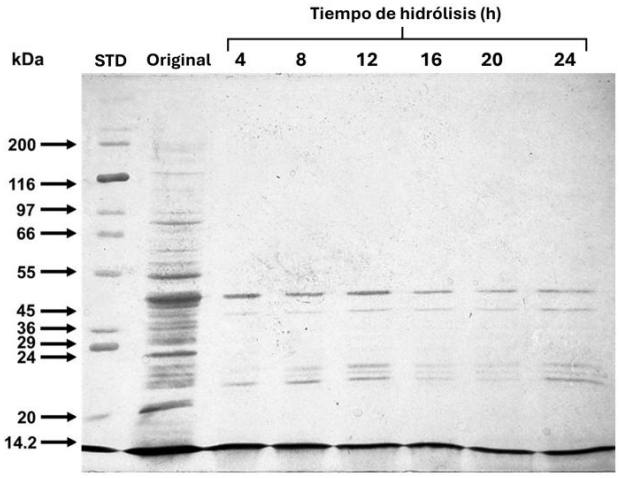


Figura 1. *Perfil electroforético (SDS-PAGE) de la proteína y sus respectivos hidrolizados con alcalasa*

La separación cromatográfica reveló cuatro picos principales mostrados en la figura 2, de los cuales el pico A-IV (MM = 0.95 kDa) mostró el mayor grado de inhibición de la DPP-IV (68 %) y de la ECA (77 %), la capacidad antioxidante presentó valores de 63 %, 89 % y 0.35 UA, para el DPPH, ABTS y FRAP, respectivamente (Tabla 1).

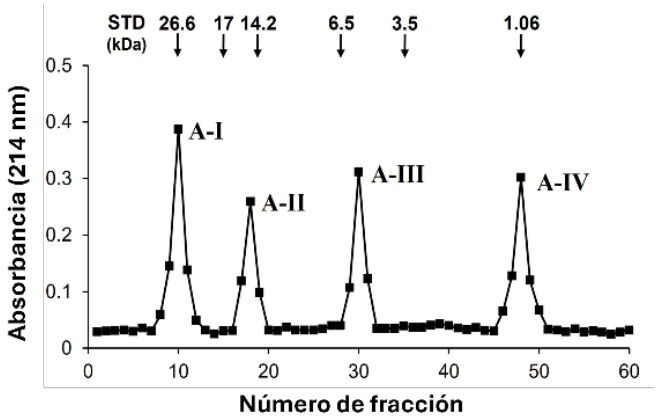


Figura 2. *Perfil de elusión por cromatografía de exclusión molecular en Sephadex G-10.*

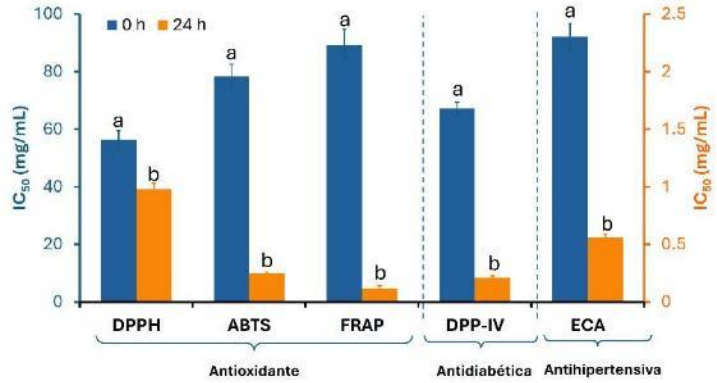


Figura 3. *Valores de IC_{50} del hidrolizado a 0h y 24 h determinados mediante los ensayos DPPH, ABTS, FRAP, DPP-IV y ECA*

Tabla 1 *Evaluación de la capacidad antioxidante, antihipertensiva y antidiabética del hidrolizado de la proteína de amaranto*

	Antioxidante			Antidiabética	Antihipertensiva
	DPPH	**ABTS**	**FRAP**	**DPP-IV**	**ECA**
0 h	11.15 ± 0.98 **a**	5.15 ± 3.41 **a**	0.095 ± 0.01 **a**	8.13 ± 0.91 **a**	10.15 ± 1.2 **a**
24h	63.12 ± 4.83 **b**	89.22 ± 5.32 **b**	0.354 ± 0.04 **b**	68.15 ± 4.1 **b**	77.43 ± 5.95 **b**

El hidrolizado de 24 h (A-IV), presentó valores de IC_{50} de 0.56 ± 0.03 mg/mL y 0.21 ± 0.02 mg/mL, para ECA y DPP-IV respectivamente. El atrapamiento de los radicales DPPH, ABTS y la capacidad reductora del Fe^{3+} (FRAP) presentaron valores de IC_{50} de 0.98, 0.25 y 0.12 mg/mL, respectivamente (Fig. 3).

CONCLUSIONES

La hidrolisis enzimática con alcalasa permitió obtener péptidos con actividad funcional significativa. Los hidrolizados proteínicos obtenidos alcanzaron un alto grado de hidrólisis y mostraron capacidad

inhibitoria sobre la ECA y DPP-IV. Además, presentaron actividad antioxidante, destacando su potencial funcional abriendo nuevas oportunidades para el aprovechamiento de este pseudocereal.

BIBLIOGRAFÍA

1. P. Algara Suárez, J. Gallegos Martinez, and J. Reyes Hernández, “Amaranto: efectos en la nutrición y la salud,” *Revista academica de investigación Tlatemoani*, vol. 12, no. 19899300, pp. 8–9, Apr. 2013.
2. A. R. Gonz, D. Caballero-Hern, and Y. S. Moreno-LimÛn, “Aprovechamiento Potencial del Amaranto.”
3. M. Naeem, M. I. Malik, T. Umar, S. Ashraf, and A. Ahmad, “A Comprehensive Review About Bioactive Peptides: Sources to Future Perspective,” *Int J Pept Res Ther*, vol. 28, no. 6, p. 155, Oct. 2022, doi: 10.1007/s10989-022-10465-3.
4. V. A. Tironi and M. C. Añón, “Amaranth proteins as a source of antioxidant peptides: Effect of proteolysis,” *Food Research International*, vol. 43, no. 1, pp. 315–322, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.foodres.2009.10.001.
5. Y. Tak, M. Kaur, R. Amarowicz, S. Bhatia, and C. Gautam, “Pulse Derived Bioactive Peptides as Novel Nutraceuticals: A Review,” *Int J Pept Res Ther*, vol. 27, no. 3, pp. 2057–2068, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10989-021-10234-8.
6. J. Soriano-Santos, S. Iwabuchi, and K. Fujimoto, “Solubility of amaranth seed proteins in sodium sulphate and sodium chloride: the main factor in quantitative extraction for analysis,” *Int J Food Sci Technol*, vol. 27, no. 3, pp. 337–346, Jun. 1992, doi: 10.1111/j.1365-2621.1992.tb02035.x.
7. I. Brandt *et al.*, “Inhibition of dipeptidyl-peptidase IV catalyzed peptide truncation by Vildagliptin ((2S)-{[(3-hydroxyadamantan-1-yl)amino]acetyl}-pyrrolidine-2-carbonitrile),” *Biochem Pharmacol*, vol. 70, no. 1, pp. 134–143, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.bcp.2005.04.009.

BIOABSORBENTES NO CONVENCIONALES EMPLEADOS EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS Y COLOR EN DIFERENTES TIPOS DE AGUA

Cinthia Michelle Atilano Sanromán, Gabriela Camarillo Martínez, Soledad González Gallegos, Evelia Martínez Cano y María Alejandra Mena Hernández.

Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara.
cinthia.atilano9666@alumnos.udg.mx

RESUMEN

La contaminación del agua es un problema grave, principalmente por la presencia de colorantes y metales pesados que son utilizados en la industria, los tratamientos existentes para la remoción de estos tipos de contaminantes son costosos, por lo que el objetivo de este trabajo es usar un bioadsorbente no convencional como lo es el cascarón de huevo ya que es un material de bajo costo y que se puede encontrar fácilmente en el hogar como desecho. Mediante técnicas como molienda, trituración y tamización del cascarón de huevo y posteriormente un tratamiento térmico a 800ºC durante 3 horas se obtuvo el producto que se usó como bioadsorbente, las pruebas de adsorción realizadas fueron en soluciones de 25 mL de un colorante de textiles en tono azul marca comercial Mariposa en concentraciones de 100 y 50 ppm y de sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) en concentraciones de 0.1 y 0.05 M a las que se les agregó 0.5 g del cascarón de huevo (calcinado y sin calcinar) para que el proceso fuera uniforme se colocaron las mezclas en agitación a 370 rpm durante 6 horas para después realizar una medición de adsorción cada hora en espectrofotómetro UV-Vis para el colorante (580 nm) y para el $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (775 nm). Los resultados indicaron que el $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ en las concentraciones mencionadas se eliminan en su totalidad al utilizar el cascarón de huevo calcinado en un lapso de 6 horas, y para el caso del cascarón de huevo sin calcinar el tiempo de adsorción total fue ligeramente mayor de 6.5 horas. En el caso del colorante también la remoción fue completa, pero en 3 horas al usar el cascarón de huevo calcinado y sin calcinar. Por lo que se concluye que, el cascarón de huevo en su forma calcinada y sin calcinar es un bioadsorbente efectivo para la remoción de metales pesados y colorante de telas en el agua, sin embargo, al usar el calcinado se obtienen mejores resultados en menos tiempo por lo que deberá estudiarse su estructura en un trabajo futuro.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la contaminación ambiental se ha intensificado hasta convertirse en uno de los problemas más graves y urgentes que enfrenta nuestro planeta. Esta situación es el resultado directo del crecimiento acelerado de la población mundial y del modelo de producción industrial y una sociedad consumista que genera una enorme cantidad de residuos.

Dentro de las distintas formas de contaminación que existen, la contaminación del agua representa uno de los principales desafíos ambientales que se debe atender, ya que afecta de manera directa o indirectamente a todos. La presencia de contaminantes como colorantes y metales pesados hace aún más complejo el proceso de tratar estas aguas y genera daños tanto medioambientales como a la salud humana. Para solucionar este problema han surgido métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales como la filtración, cloración, ozonización, osmosis inversa y el uso de desinfectantes, entre muchos otros, sin embargo, estos métodos pueden tener desventajas como no remover varios tipos de contaminantes o ser muy costosos e inaccesibles para muchas poblaciones de bajos recursos.

Ante este panorama, ha cobrado relevancia el desarrollo de tecnologías no convencionales que sean más sostenibles, económicas y accesibles. Una de las alternativas más prometedoras es el uso de procesos de adsorción, una técnica en la cual los contaminantes se adhieren a la superficie de un material sólido, removiéndolos así del agua. Este método ha demostrado ser eficaz, versátil y de

bajo costo, especialmente cuando se utilizan materiales de desecho o de origen natural como adsorbentes.

Este trabajo tiene el objetivo de utilizar el cascarón de huevo como bioadsorbente para remover estos contaminantes del agua. Este material surge como un bioadsorbente innovador y de gran potencial ya que es un residuo orgánico, ampliamente disponible y comúnmente desechado como basura doméstica, está compuesto principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$), material con propiedades fisicoquímicas adecuadas para la adsorción de diversos contaminantes.

TEORÍA

La adsorción la podemos definir como un proceso en que una sustancia permanece retenida desde la fase líquida al área de un sólido ya sea por medio de fuerzas físicas o químicas, en este concepto de adsorción se puede comprender la utilidad de las sustancias granulares ya sea con o sin ajuste del pH, para que se lleve a cabo el proceso de adsorción se deben de tener en cuenta ciertos factores los cuales pueden intervenir en la adsorción, uno de los más importantes es el área superficial específica en la cual el adsorbente debe de tener una mayor superficie para mayor retención del adsorbato pero de acuerdo a esto también es importante conocer cuál es la estructura química del adsorbato así como su solubilidad y su naturaleza iónica.

El cascarón de huevo está compuesto por una capa mineral la cual está conformada por numerosos poros ya que la función principal de esta es permitir el intercambio de gases en la formación del producto y el exterior, la cáscara está compuesta también por unas capas orgánicas, una cutícula que recubre la capa externa y por una capa mineral, la parte más gruesa de la capa mineral está constituida por calcita (carbonato de calcio), si bien el cascarón contiene muchos más elementos en su estructura es el 95% del peso de este lo que está recubierto por carbonato de calcio, en resumen, se puede describir a la cáscara de huevo como un modelo de mineralización que consta de una fase orgánica y otra fase mineral que es el compuesto que actúa en la remoción tanto de los metales pesados como de los colorantes.

La adsorción tiene lugar en el interior de las partículas de los poros en puntos determinados de las paredes así que teniendo en cuenta esto la cantidad del adsorbato será proporcional al volumen que se tiene. Generalmente los tamaños adecuados para la remoción son de 800 µm, 400 µm y 200 µm para posteriormente calcinarla esto para que la transformación que tiene lugar en este proceso tenga la finalidad de eliminar el agua que está presente dentro de la cáscara molida evitando así que contenga tanto la humedad de la cristalización como de la humedad adsorbida, en cuanto al tamaño de los poros en el caso de las 200µm se puede tener mayor capacidad de adsorción gracias a la presencia de puntos de cizalla y alteraciones estructurales en los poros.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación del bioadsorbente

1. Triturar el huevo con ayuda de un mortero de porcelana previamente esterilizado para que las partículas fueran lo suficientemente pequeñas para posteriormente tamizarlo.
2. Se colocan en un tamizador mecánico las cáscaras de huevo trituradas y se clasifica el material de acuerdo con el número de malla del tamizador.
3. Elegir qué números de malla se usan para el procedimiento o las pruebas de adsorción.
4. Calcinar las cáscaras de huevo en una mufla a 800°C durante 3 horas.

Figura 1. Tamizador mecánico marca Retsch modelo AS200.

Apertura de mallas	
Malla	**Apertura (mm)**
40	0.45
80	0.20
100	0.15
200	0.075

Tabla 1. Se indica el tamaño de las mallas en milímetros.

Preparación de soluciones

5. Preparar un volumen considerable de soluciones de 100 ppm y 50 ppm para el colorante comercial y de 0.1 y 0.05 M para el $CuSO_4*5H_2O$.

Ensayos de adsorción

6. Se colocaron 25 ml de cada solución (colorante comercial y $CuSO_4*5H_2O$) en 20 matraces previamente esterilizados de 50 ml para después agregarle a cada uno 0.5 g de cada bioadsorbente (cascaron de huevo sin calcinar y calcinado) ambas presentaciones fueron con las mallas 40 y 80.
7. Posteriormente los matraces se colocaron en agitación magnética. El equipo utilizado fue una parrilla de agitación magnética a 370 rpm con una barra de agitación durante 6 horas.

Medición de adsorción

8. Antes de medir cada muestra en el espectrofotómetro se filtraron las muestras mediante dos procesos en uno se utilizaron jeringas que contenían un pequeño pedazo de papel filtro de cafetera en la base y sobre este algodón comercial, la segunda filtración se realizó con filtros de jeringas de nylon con una porosidad de 0.42 µm.
9. Cada hora se toma una muestra y se le midió la adsorción en el espectrofotómetro UV-Vis (además se realizaron curvas de calibración para determinar la concentración de las muestras por la Ley de Lamber y Beer), para el colorante azul se midió en 580 nm y para el $CuSO_4*5H_2O$ en 775 nm.

RESULTADOS

Se obtuvieron varios lotes de cáscara de huevo calcinado, cuya principal característica fue el oscurecimiento de la mayoría del material, adquiriendo un tono negro. Esto se debió a la presencia de materia orgánica, la cual se carbonizó y también la textura del cascarón se volvió más fina debido a los cambios físicos provocados por las altas temperaturas.

Figura 2. Cáscara de Huevo Sin Calcinar

Figura 3. Cáscara de Huevo Calcinada

Para el Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$) en la concentración de 0.1 M, los niveles de absorción de la solución disminuyeron, lo que nos comprobó la eficacia de nuestro bioadsorbente, ya que el resultado fue, en su mayoría, cercano a cero.

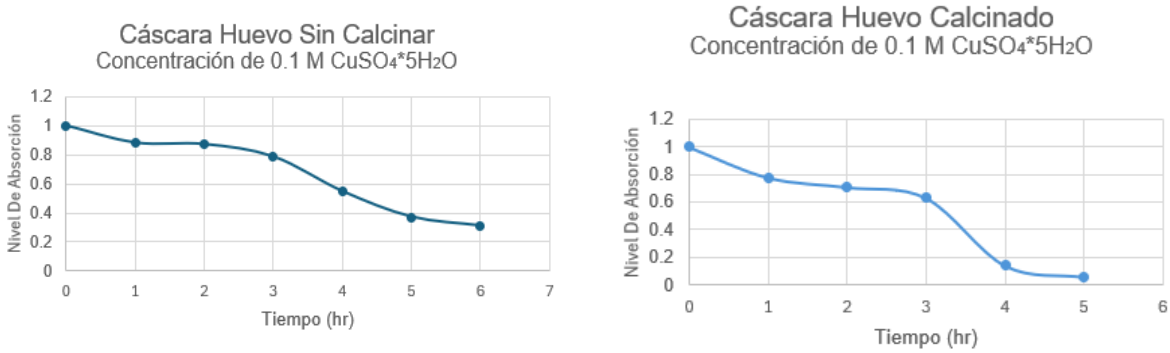


Figura 4. Comparación entre las dos presentaciones de la cáscara de huevo: sin calcinar y calcinada, ambas en una concentración de 0.1 M. Se muestra la medición de niveles de adsorción del Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$) con respecto al tiempo (6 horas) utilizando un espectrofotómetro UV-Vis.

En el caso del Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$) a una concentración de 0.1 M, al comparar ambas presentaciones de la cáscara de huevo, se observó que la cáscara calcinada, tamizada en mallas 40 y 80, presentó una mayor adsorción. La concentración de la solución disminuyo de 0.1 M a aproximadamente a 0.01 M después de 6 horas. En contraste mientras la cáscara sin calcinar redujo la concentración solo hasta 0.06 M. Para la obtención de las concentraciones finales, se realizo una curva de calibración y se aplicó la Ley de Lambert y Beer.

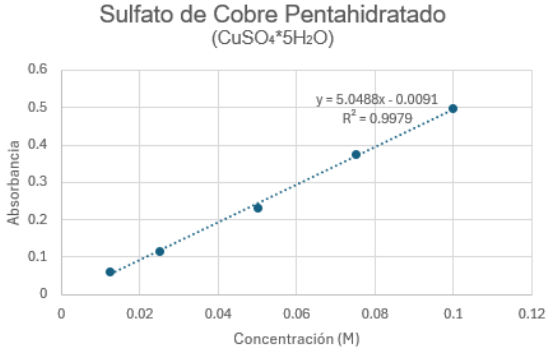


Figura 5. Curva de Calibración

$$y = mx + b$$

$$y = 5.0488x - 0.0091$$

$$x = \frac{0.059 + 0.0091}{5.0488}$$

$$x \approx 0.01\ M$$

Figura 6. Obtención de Concentración mediante la Ley Lamber y Beer

Para el Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$), en una concentración de 0.05 M, al comparar ambas presentaciones de la cáscara de huevo, se obtuvo un comportamiento similar al resultado anterior. La cáscara de huevo calcinada logró adsorber casi por completo la concentración, y ambas presentaciones redujeron la concentración de la solución a valores cercanos a cero.

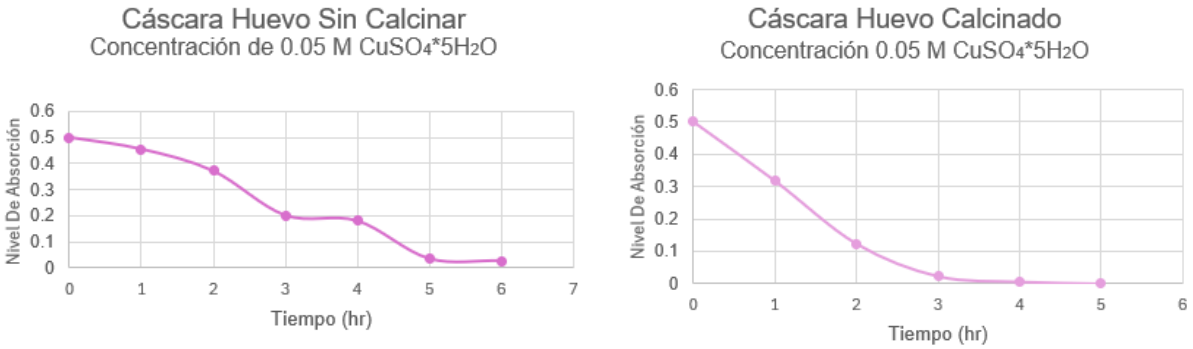


Figura 7. Comparación entre las dos presentaciones de la cáscara de huevo: sin calcinar y calcinada, ambas a una concentración de 0.05 M. Se muestra la medición de los niveles de absorción del Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$) con respecto al tiempo (6 horas) mediante un espectrofotómetro UV-Vis.

En cuanto a la perdida de concentración en el Sulfato de Cobre Pentahidratado ($CuSO_4*5H_2O$) a 0.05 M, al comparar ambas presentaciones de la cáscara de huevo, se observó nuevamente que la cáscara de huevo calcinada (mallas 40 y 80) presentó una mayor adsorción. La concentración disminuyó de aproximadamente 0.05 M a 0.002 M para el final de las pruebas, mientras que la cáscara de huevo sin calcinar se redujo a 0.007 M. Para la obtención de estas concentraciones finales, se realizaron los mismos cálculos que en el anterior caso (**Figura 5 y 6**).

En el caso del Colorante Comercial a una concentración de 100 ppm, al medir los niveles absorbancia mediante un espectrofotómetro UV-Vis, la comparación de la cáscara de huevo sin calcinar y calcinada mostró un resultado favorecedor en ambas presentaciones, ya que ambas lograron una adsorción final cercana a cero respectivamente en un tiempo de 3 horas.

Huevo sin calcinar colorante azul 100 ppm	
Tiempo (hr)	**ABS**
0	0.01
1	0.004
2	0.001
3	0

Tabla 2. Nivel de Absorción con respecto al tiempo (3 hr).

Huevo calcinado colorante azul 100 ppm	
Tiempo (hr)	**ABS**
0	0.01
1	0.006
2	0.004
3	0

Tabla 3. Nivel de Absorción con respecto al tiempo (3 hr).

En ambas presentaciones, la concentración del colorante comercial paso de 100 ppm a un nivel tan bajo que no pudo ser cuantificada, lo que indica una adsorción prácticamente total.

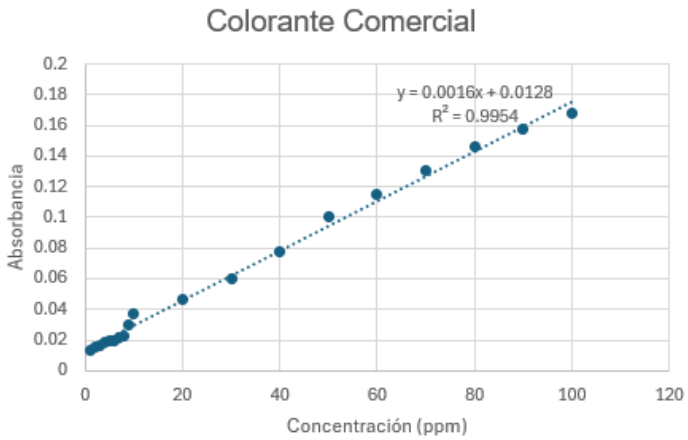


Figura 8. Curva de Calibración del Colorante Comercial.

De igual manera, en la concentración de 50 ppm del Colorante Comercial, la medición de los niveles de absorbancia mediante el espectrofotómetro UV-Vis nos arrojó resultados muy favorables, ya que el colorante fue adsorbido casi en su totalidad en un lapso de 3 horas. Como consecuencia, la concentración final fue tan baja que no pudo ser cuantificada.

Huevo sin calcinar colorante azul 50 ppm	
Tiempo (hr)	**ABS**
0	0.05
1	0.005
2	0.002
3	0

Tabla 4. Nivel de Absorción con respecto al tiempo (3 hr).

Huevo calcinado colorante azul 50 ppm	
Tiempo (hr)	**ABS**
0	0.05
1	0.014
2	0.012
3	0

Tabla 5. Nivel de Absorción con respecto al tiempo (3 hr).

Por último, a nivel visual también se notó un cambio en la coloración de las soluciones, ya que con el transcurso del tiempo fueron perdiendo intensidad y tornándose progresivamente más claras. Este comportamiento se puede observar en las Figuras 9 y 10.

Figura 9. Visualización del Antes y Después de la pérdida de concentración en la solución con Colorante Comercial.

Figura 10. Visualización del Antes y Después de la pérdida de concentración en la solución de $CuSO_4*5H_2O$.

CONCLUSIONES

El cascarón de huevo calcinado funcionó mejor de lo esperado ya que retenía más moléculas del adsorbato, si bien con el huevo sin calcinar las moléculas se adhieren de forma satisfactoria, no se removía el colorante ni el metal de forma completa como en el otro caso. Esto se debe a la estructura que se tiene en el cascarón: el cascarón de huevo sin calcinar retiene más humedad en los cristales que contiene, mientras que el huevo calcinado elimina esa humedad, lo que hace que el espacio en los poros sea mayor y, por ende, se retenga más cantidad del adsorbato. El número de las mallas del tamizador también jugó un papel importante en la remoción del adsorbato porque a mayor número de malla, menor es el tamaño de las partículas obtenidas, lo que incrementa el área superficial disponible para la adsorción. Gracias al tamaño de sus poros y a los puntos de cizalla, que son zonas donde el material experimenta esfuerzo cortante y puede fragmentarse o deformarse, se logra una mayor exposición de superficies activas, teniendo mayor capacidad de adsorción. Así como también fue de gran ayuda el filtrado posterior a la agitación.

BIBLIOGRAFÍA

1. H.J. Park, S.W. Jeong, J.K. Yang, B.G. Kim, S.M. Lee, “Removal of heavy metals using waste eggshell”, J. Environ. Sci., Vol.19, 12, 2007, pp.1436-1441.
2. M.G. Valladares Cisneros, M.G. Aranda Figueroa, J. R. Romero Domínguez, “Adsorbentes de origen vegetal y su aplicación en la remoción amigable de colorantes presentes en agua”, Inventio, Año 15, núm. 37, 2019, ISSN: 2007-1760, pp. 1-12.

EVALUACIÓN DE LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO INICIAL DE COL (*Brassica Oleracea Var. Capitata L.)* EN CONDICIONES DE AGRICULTURA DE AGUA FRÍA (COLDAG) Y AGRICULTURA CONVENCIONAL (CONVAG)

Alejandro García-Huante, Fernando C. Gómez-Merino,
Libia I. Trejo-Téllez y Amelia López-Herrera

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México, México.
garcia.alejandro@colpos.mx

RESUMEN

La agricultura de agua fría (ColdAg) o acondicionamiento para el enfriamiento del suelo en áreas con clima cálido, genera un euestrés térmico en las raíces del cultivo, obteniendo plantas con un mejor desarrollo y crecimiento. En el presente trabajo se compararon las condiciones de agricultura de agua fría (ColdAg) y agricultura convencional (ConvAg) en la germinación de semillas y acumulación de biomasas fresca y seca de plántulas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). Para ello, se determinaron los efectos de ambos tratamientos bajo las siguientes condiciones en cámaras de germinación: 1) Agricultura de agua fría (ColdAg: 35 °C temperatura dentro de cámara de germinación, 14.8 °C temperatura del flujo de agua para enfriamiento de suelo, 85 % humedad relativa; y 2) Agricultura convencional (ConvAg: 25 °C temperatura dentro de la cámara de germinación, 20 °C temperatura de agua para irrigación, 70 % de humedad relativa); en ambos casos la irradiancia fue de 334 µmol m^{-2} s^{-1}. Se estimaron las variables de germinación, así como el peso de la biomasa fresca y seca de las plántulas emergidas. Los resultados mostraron que el tratamiento ConvAg superó al ColdAg en 128.9 % en el caso de germinación diaria total; esto debido a que la temperatura óptima para la germinación en col oscila entre 15 y 25 °C; dichas temperaturas coinciden con las del tratamiento ConvAg (20 - 25 °C). Además, se observó que el tratamiento ColdAg retardó el proceso germinativo por 2 d, por lo que prolonga e impacta el porcentaje de germinación total, el cual fue de 4 % mayor en ColdAg. Esto puede deberse a que el enfriamiento del suelo ocasiona que la humedad sea suficiente en el sustrato o suelo para que el proceso germinativo se complete. En el caso de la biomasa fresca de plántula, el tratamiento ColdAg fue mayor a ConvAg en aproximadamente 66.3 %; mientras que, la biomasa seca de plántula del tratamiento ColdAg fue mayor en 149.7 %, esto debido a que el enfriamiento del suelo genera condensación del vapor de agua existente entre los poros del suelo y permite la humedad suficiente para que las raíces puedan absorber y transportar el agua, generando un mayor desarrollo de las plántulas. Si bien el sistema de agricultura de agua fría (ColdAg), puede prolongar el periodo de germinación de las semillas de col, presenta mejores resultados en producción de biomasas fresca y seca de plántulas en comparación con plántulas que crecen en condiciones de agricultura convencional (ConvAg).

INTRODUCCIÓN

El incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero y su impacto en el cambio climático global han propiciado la necesidad del sector agrícola a tomar medidas de adaptación a los nuevos escenarios. Entre sus efectos se encuentran olas intensas de calor, sequías, inundaciones, y proliferación de plagas y enfermedades, que afectan la disponibilidad y acceso a los alimentos (Heikonen *et al*., 2025). En el caso de nuestro país, este se calienta más rápido que el promedio global, destacando el año 2020 el cual fue el más cálido que se ha registrado, estando por arriba de 1.6 °C (Estrada *et al*., 2024). El aumento de las temperaturas en las zonas alrededor del ecuador producirá estrés en las plantas y conducirá a un menor rendimiento de los cultivos, mientras que, en zonas templadas y frías cercanas a los casquetes polares, el aumento en la temperatura y la mayor cantidad de CO_2 atmosférico podría aumentar el rendimiento de algunos cultivos (Grigorieva *et al*., 2023). La seguridad alimentaria a nivel mundial enfrenta serios retos que requieren el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan producir alimentos en condiciones limitativas, que a su vez sean energéticamente eficientes y ambientalmente sostenibles a largo plazo (FAO, 2024; Xiao *et al*.,

2024). Entre estas se incluye la agricultura de agua fría (ColdAg) o acondicionamiento para el enfriamiento del suelo en áreas bajo condiciones controladas de clima cálido, donde se genera un estrés térmico en las raíces del cultivo, obteniendo plantas con un mejor desarrollo y crecimiento (Graamans *et al*., 2018). Dicha tecnología se desarrolló a partir de un sistema de energía renovable marina conocida como Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), por medio de la cual se bombea agua marina profunda fría y agua superficial cálida para producción de energía eléctrica, además puede aprovecharse el volumen de agua oceánica para generar cultivos de zonas templadas en áreas tropicales (García-Huante *et al*., 2024). Bajo estas condiciones, se han reportado mayores rendimientos por unidad de área, así como una mayor eficiencia en el uso del agua, en comparación con cultivos en condiciones de agricultura convencional (ConvAg). Esta tecnología se está implementando en algunos cultivos como col, lechuga, tomate y rábano (Ghosh y Ganguly, 2017). En este estudio se utilizó la col como cultivo modelo, una especie que se puede adaptar a un amplio rango de condiciones ambientales. Es una especie rica en vitamina C que tiene una demanda muy importante en el mercado en fresco, al presentar vida óptima de anaquel para embarques a largas distancias y alto rendimiento. El estudio tuvo como objetivo comparar el efecto de las condiciones de agricultura convencional (ConvAg) y agricultura de agua fría (ColdAg) en variables de germinación y producción de biomasa fresca y seca de col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.).

TEORÍA

El sistema OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), no solo aprovecha la diferencia de temperatura de las zonas superficial y profunda del océano para generar electricidad en latitudes tropicales, también genera subproductos para el beneficio de las comunidades costeras como agua potable, aire acondicionado, acuacultura de zona profunda y agricultura de agua fría (ColdAg) (García-Huante *et al*., 2024). Derivado de los principios del sistema OTEC, la agricultura de agua fría (ColdAg) utiliza la temperatura fría de las tuberías de agua del océano profundo para crear un entorno de suelo saludable y adecuado en la plataforma continental, para que diversas especies de plantas crezcan y prosperen en las condiciones costeras tropicales más duras. El suelo enfriado crea una condición de mayor humedad, promoviendo un crecimiento vigoroso de plantas de prácticamente cualquier zona climática. Esta innovación permite el control de la temperatura del suelo y la latencia de las plantas, lo que permite la producción de cultivos múltiples por año. Requiere poca o ninguna irrigación adicional, ya que las tuberías frías generan abundante condensación de agua dulce (Herrera *et al*., 2021). Actualmente, las investigaciones en la tecnología de ColdAg han avanzado en otros países como en la isla Kume, prefectura de Okinawa, Japón. En este sitio, el agua fría es bombeada a través de una serie de mangueras que están incrustadas en el suelo, enfriándolo y asegurando la producción de cultivos como la espinaca (García-Huante *et al*., 2022). En Estados Unidos se ha empleado el agua de mar fría para el riego de las uvas y continúan produciendo tres cosechas al año (cada 120 días) desde 1997, utilizando únicamente agua fría del mar (Yu, 2015). En Malasia se ha empleado el uso del enfriamiento del suelo para el crecimiento de cultivos templados bajo climas tropicales usando como modelo vegetal a la lechuga. Cuando las plantas fueron expuestas al suelo frío, presentaron mayor peso promedio y desarrollo de sus raíces, tallos y hojas en los tres ciclos de crecimiento, y hubo mayor diversidad microbiana en el suelo (Sabri *et al.,* 2018). Con este tipo de sistema de cultivo es posible producir cultivos templados durante todo el año, que, aunado al aprovechamiento de la recirculación del agua fría profunda del mar, derivada del proceso OTEC y combinado con fertilizantes orgánicos y otras prácticas agrícolas, se podrían producir cultivos comerciales a gran escala.

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico y establecimiento del experimento

Se utilizaron semillas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) cv. Royal Vantage (Sakata Seed America, Morgan Hill, CA, EE. UU.). Esta investigación se condujo bajo las condiciones que se describen en el **Cuadro 1**. En ambas condiciones experimentales, la intensidad luminosa fue de 334 µmol m^{-2} s^{-1}.

Cuadro 1. Condiciones experimentales para probar el efecto de la agricultura de agua fría (ColdAg) en la germinación y el crecimiento inicial de col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) en comparación con la agricultura convencional (ConvAg).

Tratamiento	Temperatura	Humedad relativa (%)	Semillas por unidad experimental	Total de semillas
ColdAg	35 °C en cámara de germinación/Flujo de agua fría a 14.8 °C	85	10	30
ConvAg	25 °C en cámara de germinación/Irrigación con agua corriente a 20 °C	70	10	30

Para cada tratamiento se colocaron tres macetas de plástico de 300 mL de capacidad (altura 7.5 cm, base 7 cm, boca 10 cm). Las macetas se llenaron con el sustrato comercial de la marca Nutrigarden® (Querétaro, Qro., México) conformado en proporción por turba de musgo del género *Sphagnum* (3-10 %), perlita (0.5-1.5 %), corteza de pino y coco molida (25-45 %). El diseño experimental tuvo una distribución completamente al azar, en el que sembraron 30 semillas por cada tratamiento en tres macetas (10 semillas por maceta, unidad experimental) a una profundidad de 0.5 cm en arreglo horizontal.

Para las condiciones de ColdAg, se hizo pasar una manguera de plástico de 0.9 mm de diámetro de forma horizontal a la altura media de cada una de las tres macetas por donde recirculó agua destilada fría (14.8 °C) de manera constante, en un sistema de circuito cerrado. El agua fría se desplazó por medio de un enfriador de agua (S&A CW-3000, Guangzhou, China), el cual integra una bomba hidrostática interna, un serpentín metálico y un ventilador, con la finalidad de enfriar el sustrato colocado en las macetas (**Figura 1**, imagen superior). Las unidades experimentales del tratamiento ColdAg se colocaron en la parte superior de una cámara de crecimiento (Shellab® LI15, Cornelius, OR, EE. UU.), sobre una charola de plástico. Las condiciones de incubación fueron: temperaturas diurna y nocturna de 35 y 30 °C, respectivamente; 12 h de luz; humedad relativa del 85 %; e intensidad luminosa de 334 µmol m^{-2} s^{-1}.

Para ConvAg se utilizó una segunda cámara de germinación donde se colocaron las unidades experimentales. Las condiciones dentro de la cámara fueron: temperaturas diurna y nocturna de 25 y 20°C, respectivamente; 12 h de luz; humedad relativa del 70 %; e intensidad luminosa de 334 µmol m^{-2} s^{-1}. En este tratamiento, no hubo flujo de agua fría que bajara la temperatura del sustrato en la zona radical. En ambos tratamientos (ColdAg y ConvAg), cada maceta fue regada inicialmente con 100 mL de agua corriente, posteriormente, se regó el sustrato hasta alcanzar la capacidad de campo dos veces al día (a las 08:00 h y a las 16:00 h). El experimento tuvo una duración de 23 d desde la siembra de las semillas hasta la cosecha de las plántulas.

Germinación

Cada 24 h por 16 d se realizó el registro de semillas germinadas. Con estos datos, se estimaron las siguientes variables: tiempo medio de germinación (T_{50}), porcentaje de germinación (PG), germinación diaria total (GDT), coeficiente de velocidad de germinación (CVG) e Índice de germinación (IG), de acuerdo con las metodologías descritas por González-Zertuche y Orozco-Segovia (1996) y Kader (2005) (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Parámetros de germinación, fórmulas y descripción de variables consideradas para evaluar el efecto de la agricultura de agua fría (ColdAg) en la germinación de semillas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) en comparación con la agricultura convencional (ConvAg).

Parámetro	Fórmula	Descripción
Tiempo medio de germinación (T50)	Tiempo en días en la cual se obtiene el 50 % de las semillas germinadas	Es el número de días necesarios para obtener el 50 % de lase semillas germinadas
Porcentaje de germinación (PG)	PG = No. de semillas germinadas en un lote x 100	El valor más alto del PG representa el valor más grande de germinación en una población de semillas
Germinación diaria total (GDT)	GDT = No. de semillas germinadas diariamente	Es el valor de semillas germinadas por día hasta el final del proceso de germinación
Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)	CVG = Total de semillas germinadas / ∑(N1/1+N2/2+…Nn/n)	Indica la rapidez en la germinación. Incrementa cuando el número de semillas germinadas aumenta y el tiempo de germinación disminuye. El CVG más alto posible es 100 (cuando todas las semillas germinan el primer día).
Índice de germinación (IG)	IG (%) = RSG – RGR / 100	Indica la relación de la germinación relativa de las semillas (RSG) y el crecimiento relative de la radícula (RGR).

Biomasa fresca y seca

A los 23 d después de la siembra, las plántulas fueron cosechadas. De cada repetición se obtuvo el peso de la biomasa fresca, y después de su secado en estufa de aire forzado (BINDER GmbH, FD115, Tuttlingen, Alemania) a 72 °C por 72 h, se obtuvo el peso de la biomasa seca. En ambos casos se utilizó una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus; Parsippany, NJ, EE. UU.).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey con un valor de significancia del 95 %. Para estos análisis se utilizó el software estadístico SAS versión 9.4.1.

RESULTADOS

Parámetros de Germinación

En el **Cuadro 3** se presentan los resultados obtenidos en las variables de germinación. Las variables tiempo medio de germinación, porcentaje total de germinación, coeficiente de velocidad de germinación e índice de germinación no fueron distintas entres los tratamientos evaluados.

Cuadro 3. Indicadores de germinación de semillas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) en condiciones de agricultura de agua fría (ColdAg) y agricultura convencional (ConvAg).

Tratamiento	GDT	T_{50} (días)	PG	CVG	IG
ColdAg	1.87 ± 0.49 b	5	66 ± 1.04 a	16.61 ± 1.04 a	6.17 ± 0.35 a
ConvAg	4.28 ± 0.64 a	5	62 ± 0.55 a	19.42 ± 0.77 a	5.40 ± 0.26 a

Medias + EE con letra distinta en cada columna indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$).

En la variable de germinación diaria total (DTG) se registraron diferencias entre tratamientos, observándose que el tratamiento ConvAg superó al ColdAg en 128.9% (**Figura 1**). Las temperaturas óptimas para la germinación de semillas de col oscilan entre 15 y 25 °C; dichas temperaturas coinciden con las del tratamiento ConvAg (20 – 25 °C). Con temperaturas iguales o superiores a 30 °C, la germinación puede acelerarse, no obstante, estas condiciones resultan perjudiciales para el desarrollo inicial de la plántula (Červenski *et al*., 2022). En este estudio se observó que el estrés térmico por enfriamiento del suelo y calor del medio (ColdAg), retarda el proceso germinativo y por tanto lo prolonga y puede impactar el porcentaje de germinación total. Es importante destacar que, si bien el porcentaje de germinación no fue estadísticamente distinto entre tratamientos, es 4 % mayor en ColdAg que en ConvAg. Lo anterior puede deberse a que el enfriamiento del suelo ocasiona que la humedad sea suficiente en el sustrato o suelo para que el proceso germinativo se lleve a cabo sin inconvenientes, pues si la sequía persiste durante un período muy alto, la germinación y el crecimiento se retrasan, provocando empobrecimiento del tubérculo y en casos severos, un rendimiento reducido debido a la ausencia de agua (Lee *et al.,* 2015).

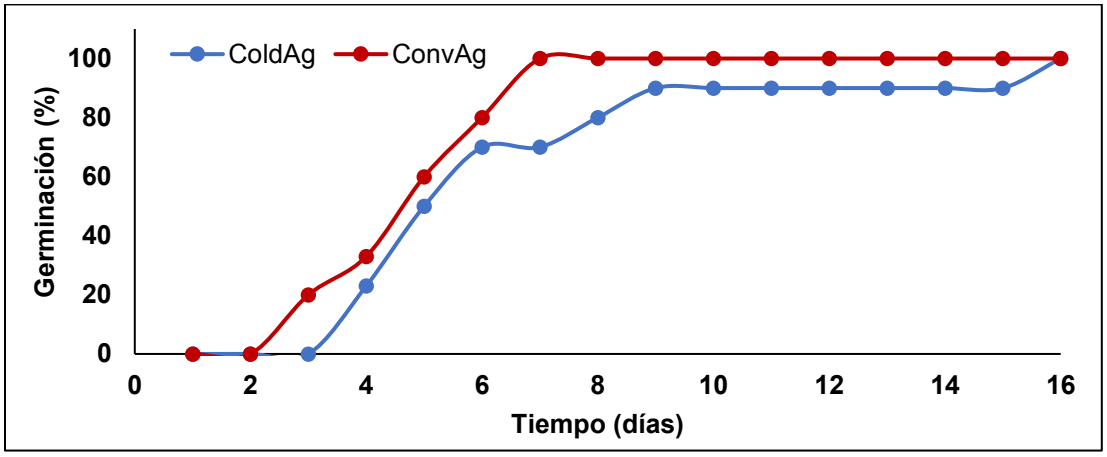


Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de col *(Brassica oleracea* var. *capitata* L.) bajo tratamiento de agricultura de agua fría (35 °C en cámara de germinación y 14.8 °C de flujo de agua fría en suelo) y agricultura convencional (25 °C en cámara de germinación).

Pesos de biomasas

Los tratamientos afectaron significativamente la producción de biomasa fresca y seca de las plántulas que fueron cosechadas 23 d después de la siembra (**Figura 2**). La biomasa fresca de plántula en el tratamiento ColdAg superó al tratamiento ConvAg en aproximadamente 66.3 % (**Figura 2a**); mientras que, la biomasa seca de plántula del tratamiento ColdAg fue mayor en 149.7 % a ConvAg (**Figura 2b**). El enfriamiento del suelo genera condensación del vapor de agua existente entre los poros del suelo y permite la humedad suficiente para que las raíces puedan absorber y transportar el agua, generando un mayor desarrollo de las plántulas (Bute *et al*., 2021).

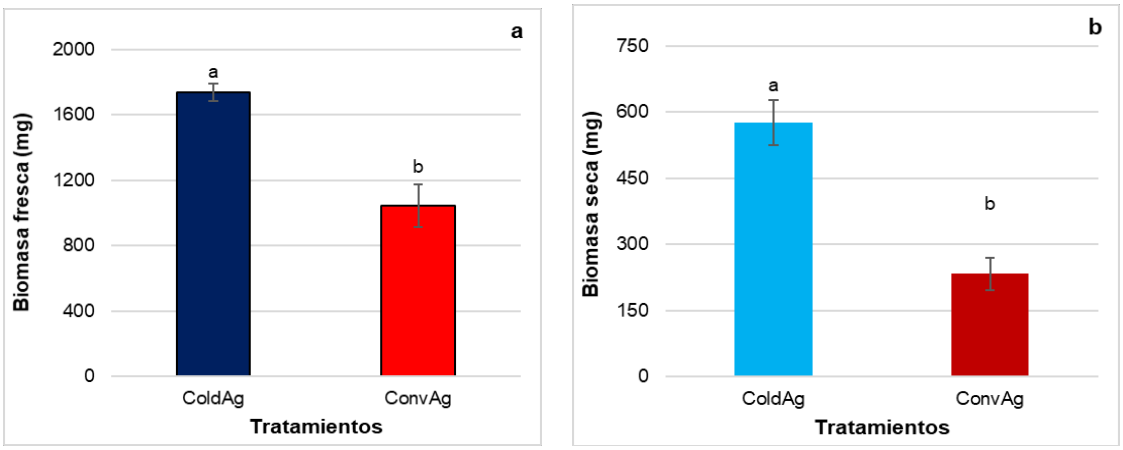


Figura 2. Peso de biomasa fresca (a) y seca (b) de plántulas de col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) por unidad experimental, en condiciones de agricultura de agua fría (ColdAg) y agricultura convencional (ConvAg). Medias ± Error Estándar con diferentes letras en cada subfigura indican que existen diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$), n=3.

Cuando se tienen altas temperaturas en el ambiente (i.e., 35 – 37 °C), el porcentaje de germinación para las semillas de col decrece en más del 50 %. Sin embargo, si se combinan temperaturas altas en el ambiente y bajas en el suelo se pueden tener mejores condiciones para la germinación, puesto que la humedad relativa puede aumentar 20 % y de esta manera, se puede tener suficiente humedad en suelo (Büyükcangaz, 2018).

En el presente experimento, el suelo se enfrió a 14.8 °C y se tuvo una humedad relativa de 85 % dentro de la cámara de crecimiento, lo que incrementó la producción de las biomasas fresca y seca de las plántulas. La temperatura en suelo frío permite el mejor crecimiento y desarrollo de las plántulas de col, en particular, en temperaturas entre 13 y 21 °C (Erken y Yildirim, 2019). Se ha demostrado que los períodos con brotes cálidos pero un sistema radicular frío, especialmente a grandes altitudes durante la mañana, pueden permitir una actividad fotosintética relativamente alta a pesar del suelo frío (Göbel *et al.,* 2019). Sin embargo, los mecanismos fisiológicos que permiten a las especies vegetales mantener una absorción de agua radicular relativamente alta a bajas temperaturas del suelo aún no se comprenden completamente y merecen mayor investigación

CONCLUSIONES

El sistema de agricultura de agua fría (ColdAg), si bien puede prolongar el periodo de germinación de las semillas de col, presenta mejores resultados en producción de biomasas fresca y seca de plántulas en comparación con plántulas que crecen en condiciones de agricultura convencional (ConvAg). En futuros estudios será necesario investigar los procesos fisiológicos, bioquímicos y moleculares que ColdAg detona en la planta, y que puedan explicar con mayor detalle las respuestas productivas observadas. La tecnología ColdAg representa una alternativa potencial para garantizar la seguridad alimentaria de una población global creciente, en condiciones de producción cada vez más afectadas por el cambio climático global.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Bute, G. A. Iosob, A. Antal-Tremurici, C. Brezeanu, P. M. Brezeanu, T. O. Cristea, S. Ambărus, “The most suitable irrigation methods in cabbage crops (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*): A review”, Sci. Papers Ser. B Hortic. Vol. LXV, 1, 2021, pp. 399-405.
2. A. García-Huante, E. P. Garduño-Ruíz, Y. Rodríguez Cueto, A. López Herrera, “ColdAg: Alternativa del sistema OTEC para combatir la escasez alimentaria en zonas tropicales”, Ambi-Agua., Vol. 81, 17, 2022, pp. 17-24.

3. A. Garcia-Huante, F. C. Gómez-Merino. L. I. Trejo-Téllez, A. López-Herrera, “Potential of cold-water agriculture (ColdAg) in Mexico: challenges and opportunities for sustainable food production”, Sustainability, Vol. 16, 10, 2024, 4298.
4. A. Ghosh, A. Ganguly, “Permance analysis of a partially closed solar regenerated desiccant assisted cooling system for greenhouse lettuce cultivation”, Sol. Energy, Vol. 158, 2017, pp. 644-653.
5. D. Xiao, D. L. Liu, X. Zhang, Y. Fan, “Editorial: Agricultural production in a warmer world: challenges and sustainable development strategies”, Front. Earth Sci., Vol. 12, 2024.
6. E. Grigorieva, A. Livenets, E. Stelmakh. “Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review”, Climate, Vol. 11, 10, 2023, pp. 1-37.
7. FAO, UNFCCC, “Climate technologies for sustainable agrifood systems transformation,” in *Climate technologies for agrifood systems transformation* (FAO, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Rome, Italy, 2024), Chapter 2, pp. 9-23.
8. F. Estrada, A. Mendoza-Ponce, O. Calderón-Bustamante, W. Botzen, “Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture”, Reg. Environ. Change, Vol. 22, 2022, 126.
9. H. Büyükcangaz, “Deficit irrigation effects on cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L. Grandslam F1) yield in unheated greenhouse condition”, Turkish J. Agric. - Food Sci. Tech., Vol. 6, 9, 2018, pp. 1251-1257.
10. J. Červenski, S. Viajić, M. Ignjatov, G. Tamindžić, S. Zec, “Agroclimatic conditions for cabbage production” Ratar. Povrt., Vol. 59, 2, 2022, pp. 43-50
11. J. Herrera, S. Sierra, A. Ibeas, “Ocean thermal energy conversion and other uses of deep sea water: a review”, J. Mar. Sci. Eng., Vol. 9, 4, 2021, 356.
12. L. González-Zertuche, A. Orozco-Segovia, “Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*”, Bol. Soc. Bot. México, Vol. 58, 1996, pp. 15-30.
13. L. Göbel, H. Coners, D. Hertel, S. Willinghöfer, C, Leuschner, “The role of low soil temperature for photosynthesis and stomatal conductance of three graminoids from different elevations”, Front. Plant Sci., Vol. 10, 330, 2019.
14. L. Graamans, E. Baeza, A. van den Dobbelsteen, I. Tsafaras, C. Stanghellini, “Plant factories versus greenhouses: comparison of resource use efficiency” Agric. Syst., Vol. 160, 2018, pp. 31-43.
15. L. Yu, “Natural energy lab fosters its own start up Paradise”, Hawaii Business Magazine, Vol. 2015, 2015, pp.169-174.
16. M. A. A. Kader, “Comparison of seed germination calculation formulae and the associated interpretation of resulting data”, J. Proc. R. Soc. of New South Wales, Vol. 138, 3-4, 2005, pp. 65--75.
17. M. K. Elson, R. D. Morse, D. D. Wolf, D. H. Vaughan, “High-temperature Inhibition of seed germination and seedling emergence of broccoli”, HortTechnology**,** Vol. 2, 3, 1992, pp. 417-419.
18. N. S. A. Sabri, Z. Zakaria, S. E. Mohamad, A. B. Jaafar, H. Hara, “The use of soil cooling for growing temperate crops under tropical climate”, Int. J. Environ. Sci. Technol., Vol. 16, 2019, pp. 1449-1456.
19. O. Erken, M. Yildirim, “Yield and quality compounds of white cabbage (*Brassica oleracea* L. cv. *capitata*) under different irrigation levels”, J. Agric. Sci. Tech., Vol. 21, 5, 2019, pp. 1341-1352.
20. S. G. Lee, H. J. Lee, S. K. Kim, C. S. Choi, S. T. Park, Y. A. Jang, K. R. Do, “Effects of vernalization, temperature, and soil drying periods on the grow and yield of Chinese cabbage” Hortic. Sci. Technol., Vol. 33, 6, 2015 pp. 820-828.
21. S. Heikonen, M. Heino, M. Jalava, S. Siebert, D. Viviroli, M. Kummu, “Climate change threatens crop diversity at low latitudes”, Nat. Food, Vol. 6, 4, 2025, pp. 331-342.

ANALIZAR MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS EL CRECIMIENTO DE PLANTAS UTILIZANDO UN FERTILIZANTE A BASE DE RESIDUOS DE CAFÉ, CASCARAS DE HUEVO Y PLÁTANO

Brayan Hassiel Moreno Martínez[1], Melani Hernández Jara[2] Iván Alejandro Santos Guerrero[3] Rubí Alcalá González[4], Guadalupe Esmeralda Alcalá González[5]

Tecnológico Nacional de México/ITES de la Región Carbonífera
9617@rcarbonifera.tecnm.mx.

RESUMEN

El presente trabajo muestra una investigación que consiste en conocer el impacto de un fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo para proporcionar a una semilla de frijol una mejor germinación y un mayor crecimiento a la planta. Para llevar a cabo lo anterior se realizó un experimento debidamente organizado y se analizó con estadística descriptiva e inferencial específicamente análisis de varianza de un factor y gráficas de caja. Lo anterior para comprobar la hipótesis de estudio y darle respuesta a la pregunta de investigación "¿Cómo beneficia el uso de fertilizante a base de cascarón de huevo, cáscara de plátano y residuos de café en la germinación y crecimiento en las semillas de frijol?".

Para la experimentación se llevó a cabo la siembra de 60 semillas de frijol dividido en dos partes, 30 fueron sembradas añadiendo fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo y las otras 30 semillas se sembrarán sin añadir fertilizante. De 30 plantas que se sembraron añadiendo fertilizante 19 germinaron y en promedio crecieron 9.89 cm con una desviación estándar de 4.21 cm. Cabe mencionar que la planta que más creció midió 20 cm. De 30 plantas que se sembraron sin añadir fertilizante solo 7 germinaron en promedio crecieron 5.78 cm con una desviación estándar de 4.43 cm. Cabe mencionar que la planta que más creció midió 10.5 cm. Con lo anterior se concluye que en promedio la germinación de la planta es mayor utilizando el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo. Posteriormente se realizó un análisis de varianza de un factor para comparar el crecimiento de planta con y sin fertilizante, utilizando suma de cuadrados, con un nivel de confianza del 95 % se aceptó la hipótesis alterna el cual nos dice que si hay diferencia entre las medias de los datos y se concluye que el crecimiento de la planta es mayor utilizando el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo.

El principal propósito con la elaboración del producto es obtener un proceso sostenible de aprovechamiento de los desperdicios orgánicos, estableciendo un ciclo para transformar desechos en material útil. De esa manera esta investigación tiene por objeto el maximizar el aprovechamiento de los elementos que nos ofrece la naturaleza.

INTRODUCCIÓN

En la Región Carbonífera el suelo es pobre en nutrientes (nitrógeno, y materia orgánica), lo anterior es debido a que se tiene un ecosistema semidesértico. (Celaya-Michel, H., y Castellanos-Villegas, A. E. 2011), Por lo tanto, con este fertilizante se contribuye a enriquecer el suelo para mejorar la nutrición de las plantas ya sea de ornato u hortalizas, las plantas crecen a un ritmo natural y saludable, por lo que serán plantas más fuertes y estables, algo que no ocurre con aquellas plantas que crecen a un ritmo acelerado, por otro tipo de fertilizante sintético. (Borras, 2017).

Para lograr lo anterior se realizó un experimento debidamente organizado para conocer el impacto de un fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo para proporcionar a una semilla de frijol una mejor germinación y un mayor crecimiento a la planta, utilizando para su análisis modelos estadísticos.

El fertilizante a base de residuos orgánicos es una elección para que los hogares tengan una opción económica para nutrir sus plantas a un bajo costo. La liberación lenta, gradual y natural de nutrientes es una de las grandes ventajas del fertilizante orgánico. También es importante nombrar beneficios cuantitativos como lo son: aumentar la cantidad de nutrientes para el suelo, ser más amigables con el medio ambiente y mejorar la fertilidad del suelo.

El mejorador de suelo resultante contiene materiales orgánicos, así como nutrientes necesarios para la vida de las plantas y proporcionará a las tierras a las que se aplique prácticamente los mismos efectos beneficiosos para una tierra natural.

TEORÍA

El uso de fertilizantes se remonta al origen de la agricultura, pues los primeros agricultores muy pronto observaron que las áreas cultivadas decrecían en su productividad, por lo que fueron experimentando diferentes prácticas para recuperarlas. Una de las primeras fue la realización de la quema de materia seca de origen vegetal, pues las cenizas contribuían a la mineralización de los suelos. Como esta práctica no puede realizarse de manera continua, la opción fue practicar una agricultura itinerante, que significaba laborar uno o dos años una misma área para posteriormente trasladarse a otras, donde se cortaba la vegetación existente para que una vez seca se realizara la quema. Las áreas que se dejaban de cultivar por décadas volvían de manera natural a recuperar parte de la vegetación y fertilidad original para nuevamente ser destinadas al cultivo; este sistema ha persistido hasta la actualidad y se conoce como roza-tumba y quema. Cuando se adquirieron los conocimientos y habilidades para utilizar el riego en la agricultura, las posibilidades de practicar una agricultura itinerante quedaron limitadas, pues no se podían movilizar de igual manera las fuentes de agua y la infraestructura utilizada para abastecer de agua los cultivos, por lo que se tuvieron que buscar otras opciones para recuperar o mejorar la fertilidad de los suelos. Entre esas opciones se encuentran el aprovechamiento de los limos de las aguas utilizadas para el riego. Otro aprendizaje fue incorporar al suelo en estado verde las plantas de leguminosas y otras especies, con lo que se contribuía a mejorar la producción en las áreas donde se realizaba, lo que dio origen al uso de abonos verdes desde hace miles de años, llamados también abono sideral, práctica que se mantiene y recomienda en la actualidad. Luego de que Alexander Von Humboldt dio a conocer las propiedades que tiene el guano como fertilizante, una vez comprendidas desde la ciencia química sus cualidades en cuanto a presencia de nutrientes, éste se convirtió en uno de los fertilizantes de mayor uso en Europa y los Estados Unidos de América en el siglo XIX e inicios del XX, por lo cual se establecieron empresas para su extracción en las islas sudamericanas donde se concentraba, conformándose con ello el comercio mundial masivo de fertilizantes que perdura hasta la fecha, aunque ahora no de guano, sino de fertilizantes químicos producidos de forma industrial. Esta propuesta tecnológica fue aplicada en otros países y cultivos, obteniéndose resultados similares, por lo que las agencias de desarrollo norteamericanas y la misma Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) promovieron su adopción, por considerar que podía ser uno de los caminos para la erradicación del hambre. El modelo abría la puerta para el desarrollo de empresas en los países desarrollados que producían semillas híbridas, maquinaria y equipos agrícolas, fertilizantes, insecticidas y herbicidas. Las variedades mejoradas desarrolladas en la revolución verde fueron dirigidas a lograr altos rendimientos a partir del uso de altos volúmenes de fertilizantes, del control de cualquier planta que compitiera con los cultivos a través de labores agrícolas y el uso de herbicidas, así como también, de evitar la presencia de plagas que pudieran afectar los rendimientos, para lo cual se recomendó el uso masivo de insecticidas. Se determinaron grandes áreas para la siembra continua en el tiempo de una sola especie, por lo que se provocaba que los minerales demandados por este cultivo fueran sujetos de una extracción continua, de los cuales se reponía solo una parte de ellos, principalmente por la aplicación de fertilizantes químicos. (Escalante, 2020). Los autores Ruiz et al (2007), realizaron un diseño experimental en bloques completamente al azar de un fertilizante orgánico a base bagazo de caña, pulpa de café estiércol caprino, estiércol bovino gallinaza juntamente con la fertilización química y lo aplicaron en 6 tratamientos (surcos) en cultivo de cebolla. Las variables que se midieron fueron: altura de plantas (ap), número de hojas, (nh), número y peso promedio de bulbos (pb) y diámetro de bulbo (db); y a los 116 d, la productividad, a

través del número de plantas, producción, peso promedio del bulbo y rendimiento (r). En cuanto a las variables de productividad no se encontró diferencias estadísticas para ninguna de las variables. En todos los casos el menor promedio correspondió al testigo, por lo que se recomienda continuar los ensayos incluyendo el análisis de las propiedades químicas del suelo (Ruiz, Russián, & Tua, 2007).

El autor habla de las propiedades del plátano, un ingrediente clave en el fertilizante que se está desarrollando, principalmente nos dice Mego (2018) en su tesis es que el plátano macho contribuye con ciertos nutrientes los cuales son hidratos de carbono, fibra, minerales y vitaminas. Los beneficios que brinda el plátano son muchos, pero uno de ellos se puede ver con el potasio que lo mencionan como el "elemento de la calidad" para la producción agrícola. Esto mejora muchos aspectos de la calidad de los cultivos; mayor porcentaje comercializable del rendimiento total, aumento en el porcentaje de las proteínas en el grano, mayor contenido de aceite y vitamina C, aumento del tamaño de fruto y tubérculo. menores perdidas en el almacenamiento y transporte y vida más larga de las frutas y hortalizas en los anaqueles de los supermercados. (Pérez, 2015). El potasio es vital en los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas y no solo aumenta los rendimientos de los cultivos, sino que también beneficia muchos aspectos de la calidad de estos. Por lo tanto, la aplicación de potasio trae aparejados productos de alto valor y máximos rendimientos económicos para los agricultores. (Pérez, 2015).

Los residuos de café como abono enriquecen la tierra ya que este contiene una gran cantidad de minerales y nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, que nutre el suelo de tus plantas. Además, para los suelos más maltratados, también les proporciona esponjosidad y brinda más estructura al suelo. (Matute, 2020). La cáscara de huevo se considera residuo agroindustrial es una alternativa para el desarrollo de nuevos productos y como reemplazo de ingredientes en formulaciones ya existentes. (Revista Colombiana de Ciencia Animal RECIA, 2020)

Los autores Bencomo et al (2017) nos menciona que los estudios experimentales son de gran utilidad en las ciencias agrarias. Y que su objetivo fundamental del estudio es comparar el uso de fertilizante orgánico contra químico, en el cultivo del banano, para analizar el comportamiento del desarrollo fisiológico o crecimiento de la planta y el rendimiento productivo de banano. Se utilizó las pruebas de normalidad, paramétricas y no paramétricas. Los resultados fundamentales es que no existe diferencias significativas al 95% de confianza entre el tratamiento y el testigo, en las variables asociadas el desarrollo fisiológico o crecimiento de la planta y si existe diferencias significativas respecto a las variables de rendimiento. (Burgo B., 2017).

Los micro polvos obtenidos a partir de la cáscara de huevo contienen 36.7 g de calcio, 388 mg de magnesio y 99.8 mg de fósforo por cada 100 g de micro polvos (ITA). Y en la cáscara de plátano por cada 100 gr contiene 507mg de potasio y por último el café aporta 80 mg de magnesio por cada 100 gr. Por ello vemos que cada uno de estos aportan sus máximos nutrientes. (Leal, 2023).

Una investigación nos comenta que, para árboles y arbustos sembrados en áreas con césped, debe seguir las cantidades y el tiempo recomendado para el césped. Dependiendo de la formulación, si el fertilizante contiene más de 2 libras de nitrógeno puede quemar el césped. Si los árboles y arbusto que crecen en un área fertilizada muestran síntomas de deficiencia de nutricional, debe retrasar las aplicaciones de fertilizantes por unos meses para que no exceder las cantidades de nitrógeno requerida para la planta (favor seguir las concentraciones y el tiempo recomendados para el césped). (Donald, 2023)

“Los nutrientes necesarios para obtener un crecimiento saludable están divididos en tres categorías: primaria, secundaria y micronutrientes. Los nutrientes como nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K) están clasificados como nutrientes primarios, los cuales se necesitan en grandes cantidades en comparación con los demás nutrientes. Los nutrientes como Calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) son catalogados como nutrientes secundarios, los cuales son necesario en menos cantidades, pero siguen teniendo la misma importancia que los nutrientes primarios. La mayoría de las deficiencias

de los nutrientes secundarios y micronutrientes son fáciles de corregir al mantener el pH del suelo en un valor óptimo" (Clemson University 2016).
La aplicación de fertilizantes debe tener un descanso de temporada de invierno que es la estación en que puede o no resistir la planta, pero aun así se aconseja que antes le puedes poner del fertilizante antes de que inicie esa temporada para evitar tratar de rescatarla a último momento. Y si hablamos de tiempo no se sabe con exactitud ya que depende mucho de la planta ya que puede ser semanas o 20 días para que así se pueda mantener estable de forma propia de la planta. (University of Florida, 2016)

.

PARTE EXPERIMENTAL

El tipo de investigación es cuantitativa con intervención es experimental ya que el investigador tiene el control total de las variables que intervienen en el fenómeno en estudio, se manipulan las variables de entrada y se mide su variable de salida, lo anterior mediante un diseño de experimentos, ya que es una investigación sobre un periodo específico. Una vez planeados todos los pasos y aspectos involucrados para la experimentación, se procedió a la elaboración del experimento. Se iniciaron las pruebas y réplicas determinadas para después recopilar los datos cuantitativos; posteriormente, se realizó el análisis estadístico de datos mediante el software Minitab 18. Para esta investigación el análisis requiere comprobar las siguientes hipótesis: "El crecimiento de la planta depende del fertilizante a base de base de cáscara de huevo, plátano y residuos de café" y "La germinación de la semilla de frijol depende del fertilizante a base de cáscara de huevo, plátano y residuos de café". Los resultados de los análisis estadísticos arrojados por el software mencionado determinaron descubrimientos relevantes en la investigación.

Pasos para la experimentación

1. Definición del problema. Se realiza el diseño y el análisis de experimentos para conocer el impacto del fertilizante en la germinación y crecimiento de la planta.
2. Se seleccionaron las variables de respuesta en este caso germinación y crecimiento de la planta.
3. Verificación del estado de las máquinas e instrumentos en donde se va a experimentar, en este caso específico no se requieren máquinas complejas, solo una báscula, una cinta métrica y deshidratador solar.
4. Selección de la variable a manipular, se seleccionó utilizar la siembra de 60 semillas de frijol dividido en dos partes, 30 serán sembradas con fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo y las otras 30 semillas se sembrarán sin fertilizante. Cabe mencionar que se consideraron iguales para todas las pruebas, la cantidad de agua, el tamaño de la maceta, la exposición al sol.
5. Determinación del tipo de herramienta estadística y el número de réplicas. El diseño de experimentos que se realizó es un análisis de varianza de un factor, ya que es el que se adapta a los factores que se planean ser estudiados. Para la germinación se utilizó Estadística Descriptiva
6. Siembra y Recopilación de datos a lo largo de 15 días. De acuerdo con la literatura investigada se decidió proporcionar la cantidad de 25 gr de fertilizante a cada una de las 30 plantas que llevaban fertilizante.
7. Análisis de los resultados. Una vez que se recopilen los datos correspondientes, Se comprueba estadísticamente el factor mediante un análisis de varianza para determinar si este afecta a la variable de salida crecimiento y con Estadística descriptiva la germinación de las semillas de frijol.
8. Conclusiones sobre el experimento.

RESULTADOS

Como se observa en la tabla 1, de 30 plantas que se sembraron con fertilizante 19 germinaron, en promedio crecieron 9.89 cm con una desviación estándar de 4.21 cm. Cabe mencionar que la planta que más creció midió 20 cm como se observa en la Figura 1.

	Día				
Planta	**07-jun**	**09-jun**	**12-jun**	**15-jun**	**21-jun**
p_3	0	3	5	6	8
p_4	0	4	5	8	8
p_6	0	4.5	7	7	9
p_7	0	5	6	7	9
p_8	0	3	6	5	7
p_9	2	7.5	8	9	10
p_10	6	11	12	13	13
p_15	0	4	5	8	11
p_16	2	3	3	4	6
p_17	0	8	8	9	9.5
p_18	0.5	2.5	2.5	3	4
P_20	3	11	11	14	15
P_21	0	3.5	3.5	3	4
p_22	4.5	9.5	10	12	13
p_23	11	17	17	18	20
p_26	5	13	13.5	14	15
p_28	3	10	12	13	14
p_29	0	4	4	5	6
p_30	0	5	5	6	6.5

Tabla 1 Recopilación de germinación y crecimiento en cm de plantas de frijol con fertilizante

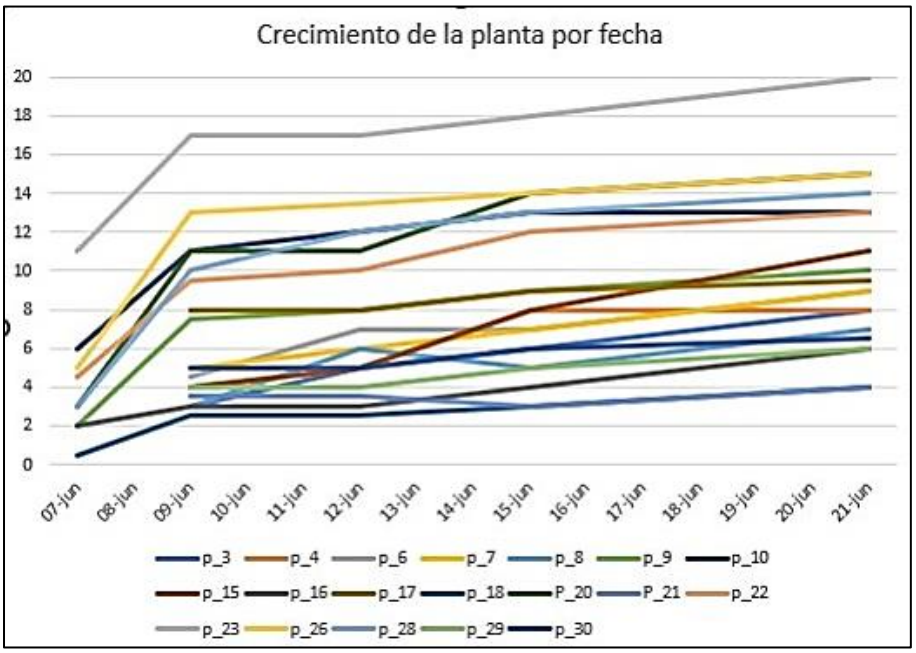


Figura 1 Gráfica de germinación y crecimiento en cm de plantas de frijol con fertilizante

Como se observa en la tabla 2, de 30 plantas que se sembraron sin fertilizante solo 7 germinaron en promedio crecieron 5.78 cm con una desviación estándar de 4.43 cm. Cabe mencionar que la planta que más creció midió 10.5 cm.

	Planta						
Día	**P_1**	**P_4**	**P_10**	**P_12**	**P_13**	**P_15**	**P_20**
07-jun	2	0	0	1	0	1	0
09-jun	0	0	2	3.5	4	6	0
12-jun	0	0	3	3.5	4.5	6	0
15-jun	0	4	4	0	6	7.5	6
21-jun	0	5	6	0	8	10	8.5
24-jun	0	5	6	0	10	10.5	9

Tabla 2. Recopilación de germinación y crecimiento en cm de plantas de frijol sin fertilizante

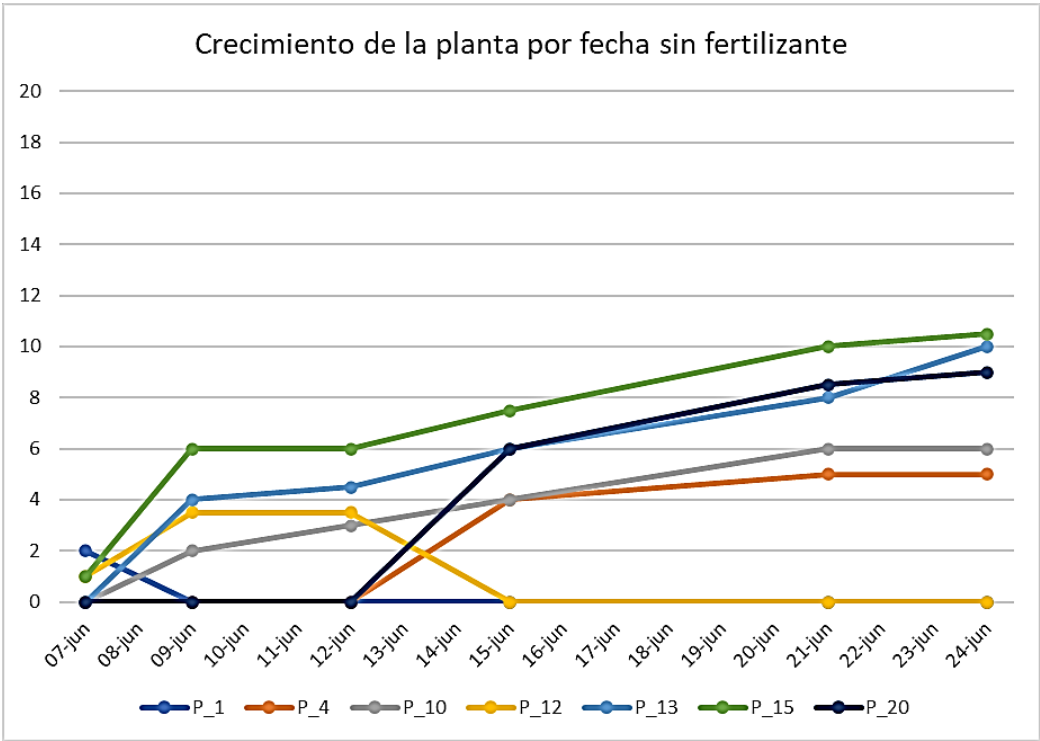


Figura 2. Gráfica de germinación y crecimiento en cm de plantas de frijol sin fertilizante

Con lo anterior se concluye que en promedio la geminación de la planta es mayor utilizando el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo.
En la figura 3 se aprecia el crecimiento de plantas sin fertilizante y con fertilizante.

Figura 3 Crecimiento de plantas sin fertilizante y con fertilizante

Posteriormente se realizó un análisis de varianza de un factor como se muestra en la figura 4 para comparar el crecimiento de planta con y sin fertilizante, utilizando suma de cuadrados, con un nivel de confianza del 95 % % se aceptó la hipótesis alterna el cual nos dice que si hay diferencia entre las medias de los datos y se concluye que el crecimiento de la planta es mayor utilizando el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo.

Análisis de varianza de crecimiento de plantas con/sin fertilizante

Source	DF	SS	MS	F	P
C2	1	572.5	572.5	35.16	0.000
Error	36	586.2	16.3		
Total	37	1158.7			

Level	N	Mean	StDev
1	19	9.895	4.218
2	19	2.132	3.844

Pooled StDev = 4.035

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

```
---------+---------+---------+------
                          (----*-----)
 (----*----)
---------+---------+---------+------
         3.5       7.0      10.5
```

Figura 4. Análisis de varianza en software Minitab 18

En la figura 5 Gráfica de caja podemos observar que la media de crecimiento sin fertilizante es de 5.78 cm con una desviación estándar de 4.43 cm y con fertilizante crecieron en promedio 9.89 cm con una desviación estándar de 4.21 cm.

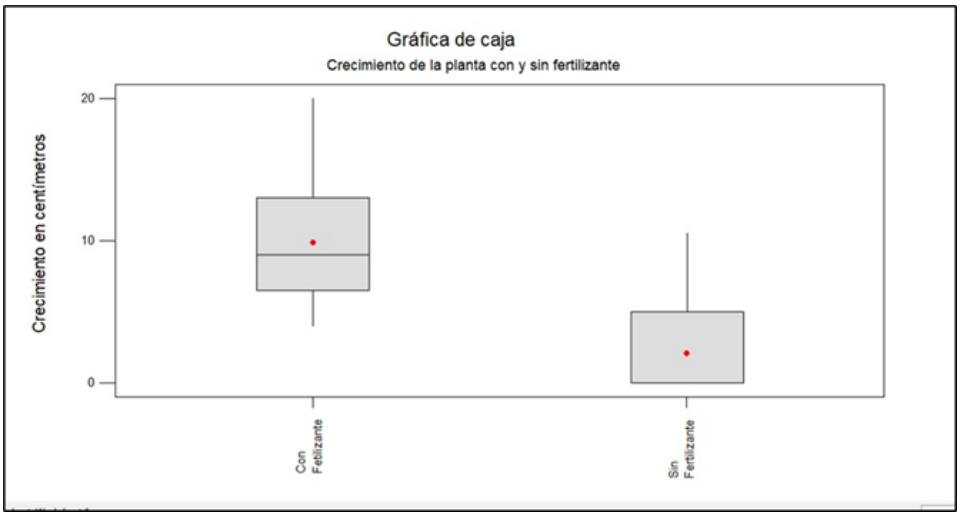


Figura 5 Gráfica de caja en software Minitab 18

En la figura 6 se muestra el diagrama de proceso para elaborar el fertilizante, así como el proceso de como de cómo aplicar el fertilizante a la planta.

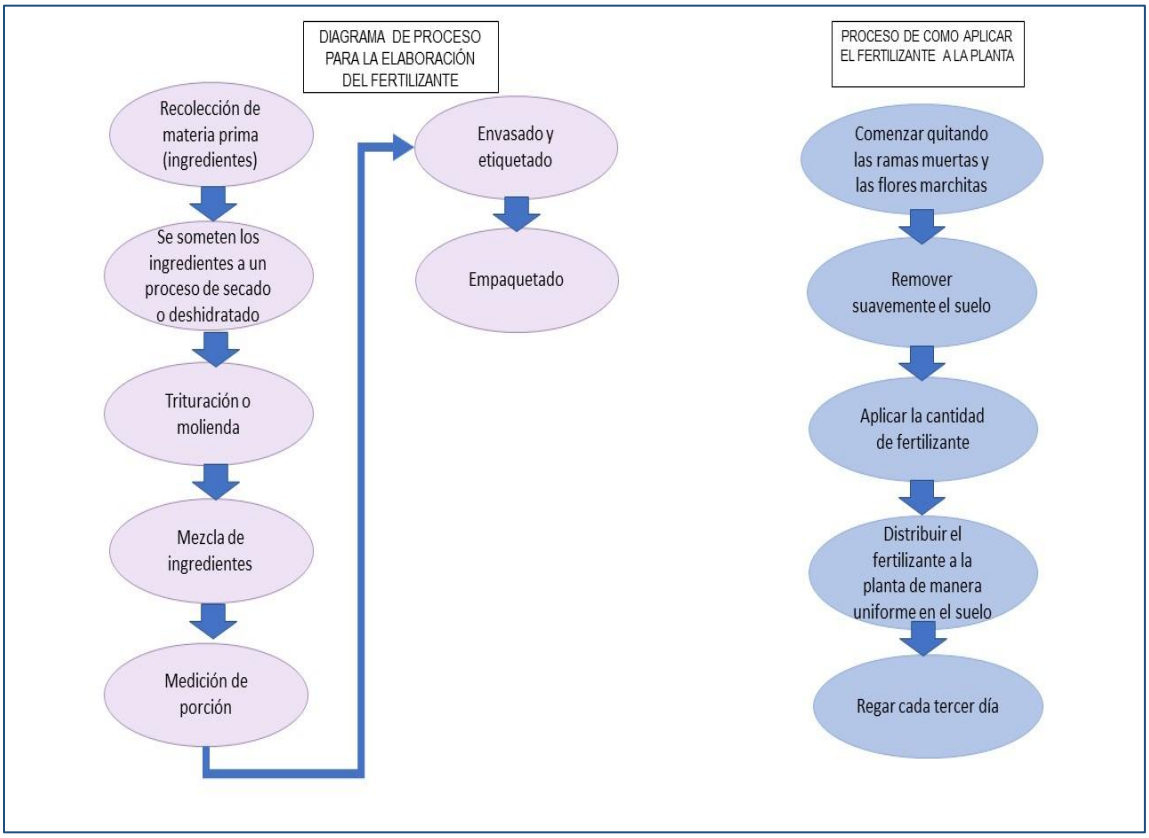


Figura 6. Diagrama de proceso para elaborar fertilizante y proceso para aplicarlo en plantas.

En la figura 7 se muestran los diagramas de Proceso para el tratamiento de los residuos de café, cáscaras de huevo y cáscaras de plátano.

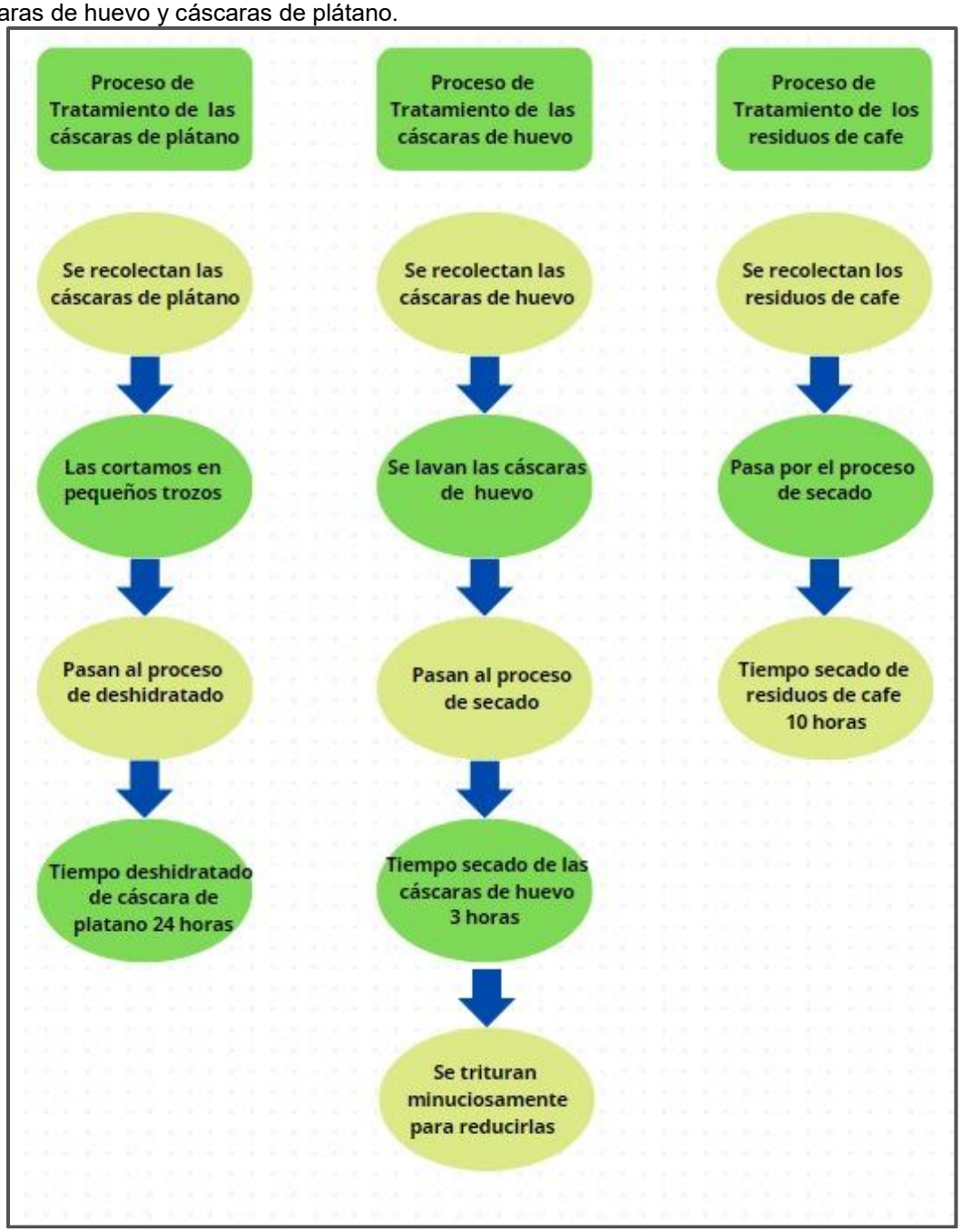


Figura 7. Diagrama de proceso para el tratamiento de los residuos

CONCLUSIONES

Los resultados que nos arrojó la investigación fueron satisfactorios ya que el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo si funciona, como se observa en la estadística descriptiva donde germinaron mayor cantidad de semillas y en el análisis de varianza muestra que si hay diferencia entre las medias en el crecimiento de la planta, siendo mayor utilizando el fertilizante a base de residuos de café, cáscara de plátano y cascarón de huevo. Lo anterior

significa que podemos aportar un tipo de fertilizante orgánico sin ningún tipo de químico en su proceso de elaboración y se ofrece una alterativa más sana a las plantas.
La Estadística Descriptiva e inferencial son excelentes herramientas estadísticas para analizar experimentos y poder replicarla por la comunidad científica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Burgo B., L. I. (2017). Revista Espacios. Recuperado el 2017, de https://www.revistaespacios.com/a18v39n09/18390909.html
2. Escalante, H. (2020). *El Salto*. La agricultura mundial, en la cuerda floja de los fertilizantes químicos. https://www.elsaltodiario.com/agricultura/agricultura-mundial-cuerda-floja-fertilizantes-quimicos.
3. Leal, K. (2023). cáscara de plátano: beneficios, propiedades, etc. Obtenido de tuasaude: https://www.tuasaude.com/
4. Matute, L. (2020). Cómo usar las sobras del café como abono en tu jardín. Architectural Digest. https://www.admagazine.com/editors-pick/guia-para-usar-los-restos-del-cafe-como-abono-en-jardin-20200508-6799-articulos
5. Mego Guerra, G.G., (2018). Evaluación del efecto biofertilizante de la cáscara de Musa balbisiana (plátano) en un cultivo de Vigna ungiculata (frijol Chiclayo). Universidad Nacional de San Martin. https://core.ac.uk/download/pdf/287332501.pdf
6. Pérez, G.B., Copacalle N.E., Saavedra A., y Heredia L. (2015). Alimentos balanceados y abonos orgánicos a partir de cascaras de frutas y hortalizas. https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/06_029/papers/08c/08c_1836_369.pdf
7. Revista Colombiana de Ciencia Animal RECIA (2020): file:///C:/Users/HP2021/Downloads/776-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2573-2-10-20201215.pdf
8. Ruiz, C., Russián, T., & Tua, D. (2007). Agronomía Tropical. Obtenido de Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de la cebolla: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2007000100002&lng=es&tlng=es.
9. University of Florida, i. o. (2016). ffl.ifas.ufl.edu. Mejores prácticas de manejo para protección de los recursos hídricos en la Florida por parte de las industrias verdes https://fffl.ifas.edu/gibmp-resources/Spanish/Spanish-Modiulo-5-FertilizereSpeakerNotes2016-06.pdf
10. Walpole, R. E. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. (9ª. ed) México: Pearson Educación

INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OG Y OG-N EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLA FORESTAL

Omar Augusto Sánchez Ortiz, Veronica Janette Cedeño Garcidueñas, Claudia Palomares Rodríguez, María Linda Herrera Herrera, Mario Mendoza Anguiano, Griceida Villegas López y José Moreno Claro

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle de Morelia
omar.so@vmorelia.tecnm.mx

RESUMEN

Este estudio experimental investigó el impacto del óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno impurificado con nitrógeno (OGNu), combinados con *Trichoderma harzianum* (TH), sobre la germinación y el crecimiento (altura) de plántulas. Se diseñaron ocho tratamientos con tres repeticiones, incluyendo controles y diversas concentraciones de OG y OGNu (0.05, 0.001 y 0.0001) junto con TH.

Los datos cuantitativos de germinación y crecimiento se recolectaron y analizaron mediante un Análisis de Varianza (ANOVA), mostrando el desarrollo de las plántulas en las charolas de germinación y sugiriendo variabilidad en el crecimiento avanzado.

Para la germinación, el ANOVA no reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Esto indica que las tasas de germinación fueron estadísticamente similares en todos los grupos. Sin embargo, se observó una tendencia numérica donde los tratamientos que combinaron OG y OGNu con *Trichoderma harzianum* mostraron porcentajes de germinación ligeramente superiores en comparación con el control.

En contraste, el crecimiento de las plántulas, medido como altura promedio a la sexta semana, sí mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los tratamientos con OG 0.001 + TH, OGNu 0.001 + TH y OGNu 0.0001 + TH indujeron las alturas promedio más elevadas, superando significativamente a los demás grupos. Por otro lado, la formulación OG 0.05 + TH y el control absoluto (Blanco) exhibieron el menor rendimiento en crecimiento. Este hallazgo sugiere una clara relación dosis-respuesta, donde concentraciones bajas de OG y OGNu, en combinación con TH, son benéficas, mientras que concentraciones elevadas podrían ser menos efectivas o incluso inhibidoras.

En síntesis, las conclusiones principales de este estudio indican que, aunque la germinación de las semillas no fue significativamente afectada, la incorporación de óxido de grafeno y óxido de grafeno impurificado con nitrógeno en bajas concentraciones, junto con *Trichoderma harzianum*, potenció significativamente el crecimiento vegetativo de las plántulas. Estos resultados subrayan el potencial de las combinaciones de nanomateriales y agentes de biocontrol para mejorar el establecimiento y desarrollo inicial de las plantas, con implicaciones para la eficiencia y sostenibilidad agrícola.

INTRODUCCIÓN

A pesar de su importancia ecológica y económica, la regeneración de estos ecosistemas enfrenta desafíos significativos, particularmente en la etapa de germinación de semillas y producción de plántulas. Muchos de los lotes de semillas utilizados provienen de recolección directa en campo y no de materiales certificados, lo que incrementa la variabilidad genética y reduce la viabilidad y la tasa de germinación. A ello se suman factores como la dormición, las condiciones ambientales adversas, y la presencia de patógenos, entre los cuales destaca el Damping off, enfermedad que puede ocasionar pérdidas [1]. Esta problemática se agrava por la falta de protocolos estandarizados para el tratamiento de semillas forestales y la limitada disponibilidad de tecnologías que mejoren tanto la germinación como la resistencia a enfermedades durante las etapas críticas del desarrollo.

Frente a este panorama, el uso de agentes biológicos como *Trichoderma harzianum* ha cobrado relevancia por su capacidad para controlar fitopatógenos y estimular el desarrollo vegetal. Estudios recientes han demostrado que este hongo no solo inhibe la incidencia de Damping off, sino que también promueve el crecimiento radicular, la altura y el diámetro de plántulas, mejorando la eficiencia en viveros forestales [2,3]. Sin embargo, la eficacia de estos tratamientos biológicos puede verse limitada por factores ambientales y la variabilidad en la calidad de los inoculantes comerciales.

Paralelamente, el avance de la nanotecnología ha permitido explorar el uso de nanomateriales como el óxido de grafeno (OG) y sus derivados funcionalizados (OG-N), debido a sus propiedades fisicoquímicas excepcionales: gran superficie específica, capacidad de retención hídrica, conductividad eléctrica y actividad antimicrobiana [4]. Estos nanomateriales han demostrado la capacidad de penetrar las paredes celulares vegetales y actuar a nivel molecular, influyendo en procesos metabólicos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración celular y la síntesis de proteínas [5,6].

El OG presenta una estructura única caracterizada por numerosos clusters hidrofóbicos sp^2 aislados dentro de una matriz hidrofílica sp^3 C-O, lo que le confiere propiedades excepcionales como transportador de agua. Los grupos funcionales oxigenados del OG actúan como colectores de agua, mientras que los dominios sp^2 hidrofóbicos forman nanocapilares ultrarrápidos que facilitan el transporte de agua hacia las semillas, acelerando significativamente el proceso de germinación [7]. En cultivos agrícolas, el OG ha mostrado mejorar la germinación de semillas y el desarrollo de raíces, además de actuar como portador de nutrientes que optimiza su liberación y absorción durante las primeras etapas del crecimiento [8].

La funcionalización del óxido de grafeno con grupos nitrogenados (OG-N) ha ampliado significativamente sus aplicaciones en agricultura, ya que estos compuestos pueden actuar como fuentes de nitrógeno de liberación controlada, mejorando la eficiencia nutricional y reduciendo las pérdidas por lixiviación [9]. Además, los estudios han revelado que el OG-N puede estimular la expresión de genes relacionados con la germinación y el crecimiento temprano, activando rutas metabólicas específicas que aceleran el proceso de emergencia de las plántulas [10].

A pesar de estos avances prometedores, el uso del OG y OG-N en especies forestales permanece escasamente documentado. Ensayos previos en especies como *Phaseolus vulgaris L.* han evidenciado que los efectos del OG pueden variar según la concentración aplicada y la variedad genética del cultivo [11], lo que subraya la necesidad de investigaciones específicas para el ámbito forestal. Estudios recientes han demostrado que dosis bajas de OG (50 µg/mL) promueven significativamente la germinación de espinaca y cebollino en suelo, incrementando las tasas de germinación hasta en un 100% comparado con los controles, mientras que concentraciones elevadas (200 µg/mL) pueden resultar contraproducentes debido a la excesiva hidrofilicidad que impide la liberación y transporte eficiente del agua [7]. Los mecanismos de acción de estos nanomateriales en semillas forestales pueden diferir considerablemente de los observados en cultivos agrícolas, debido a las diferencias en la estructura de la testa, la composición bioquímica y los requerimientos fisiológicos específicos de las especies arbóreas.

La concentración de los nanomateriales aplicados emerge como un factor crítico para maximizar los beneficios y minimizar los posibles efectos fitotóxicos. Estudios previos han demostrado que existe una ventana óptima de concentración donde se maximizan los efectos promotores del crecimiento, mientras que concentraciones excesivas pueden resultar en efectos inhibitorios o incluso tóxicos [12]. El OG a concentraciones de 50 µg/mL mejoró significativamente la retención de humedad en el suelo y aceleró la germinación, alcanzando tasas de germinación del 58.3% en espinaca después de 30 días, comparado con el 41.7% en los controles [7]. Crucialmente, estos autores confirmaron mediante análisis por espectroscopía Raman, microscopía electrónica de barrido y transmisión que el OG no se acumula en los tejidos vegetales, permaneciendo adherido a las partículas del suelo debido a la fuerte interacción entre el OG y las superficies de los granos del suelo, lo que previene su absorción por las plantas y confirma su seguridad fitotóxica. Esta relación dosis-respuesta varía

considerablemente entre especies y puede estar influenciada por factores como el pH del medio, la temperatura y la presencia de otros compuestos.

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de diferentes concentraciones de OG y OG-N en la germinación de semillas forestales, buscando no solo mejorar los porcentajes de emergencia y el tiempo de germinación, sino también reducir la incidencia de enfermedades como el Damping off y contribuir al desarrollo de alternativas biotecnológicas sostenibles para la producción forestal. Esta investigación representa un paso crucial hacia la integración de la nanotecnología en la silvicultura moderna, con el potencial de revolucionar las prácticas de producción de plántulas forestales y contribuir significativamente a los esfuerzos de reforestación y conservación a nivel nacional.

TEORÍA

La nanotecnología es una herramienta sumamente versátil con un alto potencial en la agricultura, ya que puede mejorar la productividad y contribuir a resolver diversos desafíos actuales, como la necesidad de incrementar la producción de alimentos de manera sustentable, eficiente y con menor uso de recursos como suelo y agua [6].

En este contexto, las nanopartículas, como el óxido de grafeno (OG), han demostrado ser particularmente útiles. Este material bidimensional posee propiedades notables, entre ellas una alta hidrofilicidad y capacidad para transportar agua en el suelo, debido a la presencia de hibridación sp^2 y sp^3. Estas características permiten aumentar la permeabilidad de la cubierta seminal, lo que favorece la absorción de agua y oxígeno, acelerando así el metabolismo y el proceso de germinación. Además, el óxido de grafeno no se acumula en las plantas, ya que tiende a adherirse a las partículas del suelo y presenta repulsión electrostática con las raíces, lo cual minimiza el riesgo de toxicidad. No obstante, es importante considerar que su uso debe mantenerse en concentraciones bajas para evitar efectos tóxicos. La presencia de grupos funcionales en su estructura, junto con su elevada área superficial, lo posicionan como un candidato prometedor para el desarrollo de nanofertilizantes [4,7].

El nitrógeno es un macronutriente esencial que favorece la germinación, el crecimiento, el desarrollo y la productividad vegetal. Sin embargo, su uso convencional en la agricultura ha generado importantes impactos ambientales debido a su baja eficiencia y aplicación inadecuada. En este sentido, los nanomateriales como el óxido de grafeno ofrecen una alternativa prometedora. Su funcionalización con grupos nitrogenados puede mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno, reduciendo la necesidad de fertilizantes convencionales y promoviendo el desarrollo vegetal [9].

Asimismo, la incorporación de microorganismos benéficos como *Trichoderma harzianum* puede potenciar aún más estos efectos, al mejorar el porcentaje y la velocidad de germinación, así como incrementar la altura y el peso seco de las plantas [13].

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis y funcionalización de Óxido de Grafeno (OG Y OGNu)

Para la síntesis de óxido de grafeno (OG) se utilizó el método de Hummers modificado, ampliamente empleado para la oxidación de grafito. El procedimiento comienza con la preparación de un baño frío, en un vaso de precipitados de 1L se colocan 70 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 al 98%) y 3 g de grafito natural, iniciando la agitación a 10 rpm. Después de 10 minutos, se añaden 9g de permanganato de potasio ($KMnO_4$) en pequeñas porciones, manteniendo la agitación constante y evitando el aumento de temperatura mayor a 20°C. Transcurridos 10 minutos, la mezcla se transfiere a un baño de aceite previamente calentado a 40 °C y se agita durante 30 minutos. Posteriormente, se incorporan lentamente 150 mL de agua destilada y mantiene la temperatura a 95°C. Sucesivamente, se añadieron 500 mL de agua destilada y 15 mL de peróxido de hidrógeno

(H_2O_2), agitando durante 10 minutos. Finalizada la reacción, se adicionan 250 mL de ácido clorhídrico (HCl al 10%), dejando reposar durante 24 horas. El material sólido obtenido se recupera por centrifugación y se lava con agua destilada hasta alcanzar pH neutro. Finalmente, se seca en una estufa a 90 °C.

Para la funcionalización con urea (OGNu), se dispersa 1 g de OG en 15 mL de agua y 10 mL de etilenglicol ($C_2H_6O_2$), colocando en el ultrasonido durante 4 horas. Por otro lado, se prepara una solución 4 M de urea disolviendo 10 g en 42 mL de agua. Esta solución se mezcla con la dispersión de OG y se agita durante 22 horas. Finalmente, la mezcla se somete a tratamiento hidrotérmico en autoclave a 140 °C por 12 horas, y el producto se lava y seca a 90 °C durante 36 horas.

Limpieza, selección, e inoculación de semillas de P*inus pseudostrobus* con OG y OGNu.

Previo al proceso de germinación, las semillas de *Pinus pseudostrobus* fueron sometidas a un procedimiento de limpieza y desinfección con el fin de eliminar agentes patógenos superficiales. La desinfección consiste en sumergir las semillas en una solución de hipoclorito de sodio al 1%, preparada mediante la dilución de 10 mL de cloro comercial en 990 mL de agua destilada. Las semillas permanecieron en la solución durante aproximadamente un minuto, procedimiento que fue repetido de dos a tres veces para asegurar la eliminación de contaminantes. Posteriormente, las semillas fueron enjuagadas exhaustivamente con agua destilada para remover por completo los residuos de cloro.

Una vez desinfectadas, se procedió con la evaluación de viabilidad mediante la prueba de flotación. Las semillas fueron sumergidas en agua destilada por un periodo de 12 horas. Aquellas que se hundieron fueron clasificadas como viables, mientras que las flotantes fueron descartadas por considerarse no viables.

Para la fase de inoculación, se diseñó un experimento considerando tres concentraciones diferentes para el óxido de grafeno (OG) y óxido de grafeno funcionalizado con urea (OGNu), 0.05, 0.001 y 0.0001g en 100 mL de agua destilada.

En cada tratamiento se colocó un número específico de semillas, organizadas en triplicados de 10 semillas, resultando en 30 semillas por tratamiento (Tabla 1), considerando las repeticiones necesarias para obtener datos estadísticamente válidos.

Cabe destacar que en los tratamientos fueron combinados con *Trichoderma harzianum* (TH), se adicionó una dosis estándar de 0.2 g por cada 100 mL de solución, lo que permitió evaluar el efecto sinérgico entre el hongo y los nanomateriales empleados. Las semillas se mantuvieron en contacto con las soluciones por el tiempo determinado para asegurar la adecuada impregnación de los compuestos antes de proceder con la siembra experimental.

Tabla 1. Relación de las semillas con respecto a la concentración de los tratamientos.

Tratamiento	Tipo de Tratamiento	Semillas
T1	**Blanco**	30
T2	**Blanco + TH**	30
T3	**OG 0.05 + TH**	30
T4	**OG 0.001 + TH**	30
T5	**OG 0.0001 + TH**	30
T6	**OGNu 0.05 + TH**	30
T7	**OGNu 0.001 + TH**	30
T8	**OGNu 0.0001 + TH**	30
	Total	240

Tratamiento de semillas y condiciones para el ensayo de germinación

Una vez preparadas las soluciones correspondientes para cada tratamiento, las semillas viables fueron sumergidas en su respectiva solución por un periodo de 24 horas. Durante este tiempo, se hace la impregnación de los compuestos, incluyendo el óxido de grafeno (OG) y el óxido de grafeno funcionalizado con urea (OGNu), con o sin la adición de *Trichoderma harzianum* (TH). Al finalizar el tiempo de contacto, las semillas fueron retiradas y colocadas sobre una superficie estéril para permitir un secado parcial. Este paso favorece la fijación superficial del hongo benéfico en la semilla, facilitando su propagación inicial antes de la siembra.

Para llevar a cabo el ensayo de germinación, se seleccionó un área controlada dentro del laboratorio, la cual cumplió con las siguientes condiciones ambientales: limpieza constante, temperatura estable, humedad controlada, ventilación moderada y entrada de luz solar indirecta. El cumplimiento de estas condiciones fue indispensable para asegurar la germinación uniforme y evitar alteraciones por factores externos. Asimismo, se estableció que las bandejas de germinación no debían ser desplazadas durante el experimento, a fin de mantener la estabilidad de las variables.

El diseño experimental se estructuró por triplicado, con el propósito de garantizar la validez estadística de los resultados. Se consideraron ocho tratamientos: un blanco sin ningún agente, OG y OGNu en tres concentraciones diferentes cada uno 500 mg/L, 100 mg/L y 1 mg/L, un segundo blanco con *T. harzianum*.

Condiciones de cultivo y monitoreo de germinación

Una vez colocadas las semillas tratadas sobre el acolchado de algodón en las charolas correspondientes, se aplicó un riego inicial de 30 mL de agua destilada por charola. Este riego tuvo como objetivo asegurar un nivel de humedad adecuado para el inicio del proceso de germinación, procurando que el algodón permaneciera húmedo, pero sin encharcarse. Posteriormente, las charolas fueron cubiertas para conservar las condiciones de humedad y temperatura necesarias para una germinación eficiente.

Durante el periodo experimental, se estableció un régimen de riego periódico, aplicando entre 20 y 30 mL de agua destilada por charola cada tercer día. Este procedimiento tuvo como finalidad mantener constante la humedad del sustrato, lo cual es fundamental para el desarrollo óptimo de las semillas y la prevención de estrés hídrico. Es importante destacar que se vigiló cuidadosamente que no se generara un exceso o déficit de agua en ninguna de las unidades experimentales.

Para favorecer la oxigenación de las semillas y evitar condiciones anaerobias, las charolas fueron destapadas diariamente durante un periodo de una a dos horas. Este paso permitió la renovación del aire interno y evitó la proliferación de microorganismos patógenos asociados a ambientes cerrados y húmedos.

El control de la germinación se llevó a cabo también cada tercer día, coincidiendo con el calendario de riego. Para ello, se registró el número de semillas germinadas por charola, así como la altura de las plántulas emergidas. Estas mediciones permitieron calcular la tasa de germinación acumulada y evaluar el desarrollo inicial de las plántulas, proporcionando indicadores cuantitativos del efecto de cada tratamiento.

Este procedimiento se mantuvo de forma sistemática a lo largo de todo el ensayo, garantizando la homogeneidad de las condiciones y la confiabilidad de los datos obtenidos.

RESULTADOS

La siguiente Tabla 2 muestra los datos obtenidos para los distintos tratamientos de la germinación y crecimiento de planta, mostrando el nombre de cada uno de los tratamientos y su número asignado, así como también, el conteo de las semillas germinadas y la medición de la altura cuando comenzó su crecimiento.

Tabla 2. Datos obtenidos para la germinación y crecimiento de la planta.

Tratamiento	Tipo Tratamiento	Germinación			Crecimiento		
		1R	2R	3R	1R	2R	3R
T1	Blanco	5	3	5	8.5	7.5	7.5
T2	Blanco + TH	7	6	8	8.8	8.5	8.0
T3	OG 0.05 +TH	6	7	6	7.2	7.0	7.5
T4	OG 0.001 + TH	6	7	5	9.5	9.5	9.8
T5	OG 0.0001 + TH	6	6	8	9.7	9.3	9.5
T6	OGNu 0.05 +TH	4	9	6	8.2	8.0	7.9
T7	OGNu 0.001 + TH	6	9	10	10.0	9.5	9.8
T8	OGNu 0.0001 + TH	5	5	4	10.0	9.5	9.8

Figura 1.- Germinación y desarrollo de planta.

Por otro lado, en la siguiente Figura 1 se puede observar imágenes de la germinación y crecimiento de la planta. La imagen presenta una serie de bandejas de plástico transparente utilizadas como cámaras de germinación, organizadas en una superficie plana de laboratorio. Cada bandeja contiene una base de algodón humedecido donde se encuentran germinando semillas.

En la parte superior de la imagen se observa una germinación uniforme y vigorosa de múltiples plántulas. Las plántulas presentan radículas visibles y cotiledones verdes erguidos, lo que indica un desarrollo saludable en las primeras etapas.

En la parte inferior, la imagen se divide en tres secciones adicionales que muestran acercamientos a diferentes bandejas. Del lado izquierdo: Etapas iniciales de emergencia de las plántulas, donde las radículas apenas han perforado el algodón. En el centro: Desarrollo avanzado del hipocótilo y cotiledones, con plántulas notablemente más desarrolladas y en la derecha: Variabilidad en el crecimiento de las plántulas, posiblemente asociada a los tratamientos experimentales aplicados (p.ej. uso de óxido de grafeno y *Trichoderma harzianum*).

El montaje experimental es claro, estandarizado y permite observar de forma efectiva la germinación bajo condiciones controladas. Esto puede corresponder a un experimento de evaluación de tratamientos bioestimulantes o de nanopartículas sobre la germinación y el desarrollo temprano de semillas.

La Figura 2 muestra los resultados de la germinación de semillas y el crecimiento medido en altura de las plántulas. Con los datos obtenidos se realizó el análisis de varianza para los diversos tratamientos, tanto para la germinación como para la altura alcanzada en la sexta semana. Se evaluaron ocho tratamientos con tres repeticiones cada uno, para las variables germinación y altura promedio. El análisis ANOVA muestra que no hay diferencias significativas en cuanto a la geminación, esto comparando las funciones f, dónde la fc<f de tablas 0.05 y no existe significancia, observando que los tratamientos son similares. Por otro lado, el crecimiento de la planta dónde el indicador es la altura, el análisis de varianza muestra que existe diferencia significativa para los tratamientos, teniendo los valores significativamente más altos el T4(OG 0.001+TH), T7(OGNu 0.001+TH) y T8(OGNu 0.0001+TH), mientras que el T3(OG 0.05+TH) y T1(Blanco) muestran el menor rendimiento.

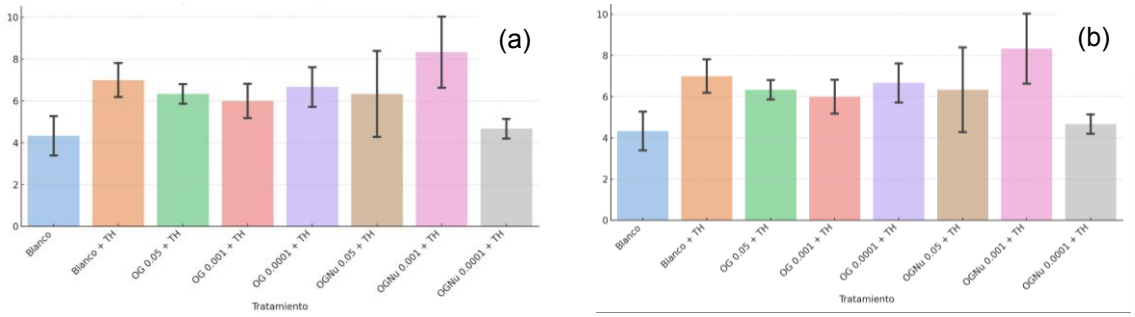


Figura 2.- Datos de (a) germinación de semillas y (b) altura de plántulas

Tabla 3. Resultados de Tukey para el crecimiento (altura) de la plántula.

Tratamiento	Promedio de altura (cm)	Respuesta
T7	9.8	A**
T8	9.8	A
T4	9.6	A
T5	9.5	A
T2	8.4	B
T6	8.0	B
T1	7.8	B
T3	7.2	B

CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos revelaron efectos diferenciados de los tratamientos sobre la germinación y el crecimiento de las plántulas.

Respecto a la germinación, el análisis de varianza (ANOVA) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Fc < F tabla, $p > 0.05$), indicando que, estadísticamente, la tasa de germinación fue similar entre todos los grupos evaluados, incluyendo el control (T1: Blanco). Sin embargo, se observó una tendencia donde los tratamientos que combinaron óxido de grafeno (OG) o óxido de grafeno impurificado con nitrógeno (OGNu) con Trichoderma harzianum (TH) exhibieron porcentajes de germinación numéricamente mayores en comparación con el control absoluto.

En contraste, el crecimiento de las plántulas, medido como altura promedio a la sexta semana, sí mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Específicamente, las formulaciones OG 0.001 + TH, OGNu 0.001 + TH y OGNu 0.0001 + TH resultaron en las alturas promedio más elevadas, superando significativamente a otros tratamientos. Por el contrario, la combinación OG 0.05 + TH y el tratamiento Blanco (sin aditivos) mostraron el menor desempeño en crecimiento.

Estos hallazgos sugieren un efecto positivo y consistente de las concentraciones bajas de OG y OGNu (0.001 y 0.0001) en combinación con Trichoderma harzianum sobre el crecimiento vegetativo de las plántulas. La disminución del efecto benéfico, e incluso una posible inhibición, en la concentración más alta (0.05) de OG y OGNu, apunta a un efecto dependiente de la dosis, donde el exceso del OG pudiera ser contraproducente, lo que invita a realizar más estudios al respecto.

En síntesis, mientras que la germinación no fue significativamente afectada por los tratamientos, la incorporación de óxido de grafeno y óxido de grafeno impurificado con nitrógeno en bajas concentraciones, junto con Trichoderma harzianum, representa una estrategia prometedora para potenciar el crecimiento de las plántulas, lo que se traduce en un mejor establecimiento y desarrollo inicial de las plantas

BIBLIOGRAFÍA

1. Babadoost M, Islam SZ. Fungicide seed treatment effects on seedling damping-off of pumpkin caused by Phytophthora capsici. Plant Dis. 2003;87(1):63-8. doi:10.1094/PDIS.2003.87.1.63
2. Cortés FC, Alvarado G, Sánchez G. Trichoderma spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. Rev Colomb Biotecnol. 2023;25(2):73-87. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384

3. Larios E, Valdovinos JJ, Chan W, García F, Manzo G, Buenrostro MT. Biocontrol de Damping off y promoción del crecimiento vegetativo en plantas de Capsicum chinense (Jacq) con Trichoderma spp. Rev Mex Cienc Agrícolas. 2020;10(3). doi:10.29312/remexca.v10i3.332
4. Zhang X, Cao H, Zhao J, Wang H, Xing B, Chen Z, Li X, Zhang J. Graphene oxide exhibited positive effects on the growth of Aloe vera L. Physiol Mol Biol Plants. 2021 Apr;27(4):815–824. doi:10.1007/s12298-021-00979-3.
5. Zhao L, Lu L, Wang A, Zhang H, Huang M, Wu H, et al. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. J Agric Food Chem. 2020;68(7):1935-47. doi:10.1021/acs.jafc.9b06734
6. Joshi H, Meena D, Tank HK. Nanotechnology in Agriculture: A Review. Int J Curr Microbiol App Sci. 2018;7(12):1763–70. doi:10.20546/ijcmas.2018.712.205
7. He Y, Hu R, Zhong Y, Zhao X, Chen Q, Zhu H. Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil. Nano Res. 2018;11(4):1928–1937. doi:10.1007/s12274-017-1810-1.
8. Vera-Reyes I, López-García M, Ruiz-Torres N, Méndez-Arguello B, Lira-Saldivar RH. Graphene oxide nanoparticles and graphite microparticles on seeds germination and growth of Solanum lycopersicum seedlings. Mundo Nano. 2024;17(32). doi:10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69734
9. Chen Q, Ren X, Li Y, Liu B, Wang X, Tu J, Guo Z, Jin G, Min G, Ci L. Promotion effect of nitrogen-doped functional carbon nanodots on the early growth stage of plants. Oxford Open Mater Sci. 2020;1(1):itab002. doi:10.1093/oxfmat/itab002
10. Liu Z, Zhou M, Liao W, Liu J, Luo C, Lu C, et al. Fertilizer-holding performance of graphene on soil colloids based on double electric layer theory. Materials. 2023;16(7):2578. doi:10.3390/ma16072578
11. Méndez Ontiveros R. Salinidad y óxido de grafeno: su influencia en la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos variedades de frijol (Phaseolus vulgaris L.) [tesis de maestría]. La Paz, BCS: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC; 2018. Disponible en: https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/3155
12. Wang S, Wang X, Liu Y, Sun G, Kong D, Guo W, et al. Regulatory effect of graphene on growth and carbon/nitrogen metabolism of maize (Zea mays L.). J Sci Food Agric. 2024;104(3):1572-82. doi:10.1002/jsfa.12879
13. Kleifeld O, Chet I. Trichoderma harzianum—interaction with plants and effect on growth response. Plant Soil. 1992;144(2):267–72

LA BIOESTIMULACIÓN CON TITANIO AFECTA LAS CONCENTRACIONES DE MICRONUTRIMENTOS EN CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* Spp.)

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1], Fernando C. Gómez Merino[1], Libia I. Trejo-Téllez[1], Juan Valente Hidalgo-Contreras[2]; Jessica Alejandra Roldán-García[1]

[1]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. [2]Colegio de Posgraduados, Campus Córdoba. dccarbajal.vh@gmail.com

RESUMEN

El titanio (Ti) es un metal de transición que ocupa por su abundancia el noveno lugar en la corteza terrestre. En suelos se puede encontrar en los minerales ilmenita, rutilo o anatasa. Las plantas pueden absorberlo y en la actualidad se considera un elemento benéfico capaz de mejorar procesos germinativos y promover la absorción nutrimental. México es octavo productor de caña de azúcar a nivel mundial, cultivo que requiere un mayor soporte técnico en términos de nutrición y bioestimulación. En esta investigación se establecieron dos cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) en invernadero, en las que se evaluó el efecto del Ti (0, 5 y 10 µM Ti a partir de TiO_2) en la concentración foliar de micronutrimentos. Para el establecimiento del experimento se usaron yemas de entre 8 y 10 cm, que se colocaron en imbibición por 18 h en cada tratamiento. Después de la imbibición, cada yema se sembró en un contenedor plástico (13 × 14 × 18.5 cm), con una mezcla de turba blanca (Super Terra ST1 Hawita) y tezontle (1:1; v:v) como sustrato. Cada maceta se regó diariamente con 200 mL de agua potable. Posterior a la siembra, se realizaron cinco aplicaciones de los tratamientos con Ti directo al sustrato, en intervalos de 10 d. A los 60 días después de la siembra, se realizó la cosecha de las plantas para análisis nutrimental. Se pesaron 0.25 g de tejido seco y se colocaron en tubos de ensayo, a los que se les agregó una mezcla de ácidos (H_2SO_4:$HClO_4$; 2:1; v/v) para realizar digestión húmeda. Después de la digestión de la materia orgánica se aforó la muestra a 25 mL con agua desionizada y se filtró. Con los resultados obtenidos, se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$). El Ti no tuvo efectos significativos en la concentración de B, Cu y Fe en el cv. CP 72-2086; sin embargo, 5 y 10 µM Ti disminuyeron las concentraciones de Mn (35 y 42 %) y Zn (43 y 33 %), con respecto a su testigo. En el cv. Mex 69-290, el Ti no afectó el B, el Cu y el Zn; aunque la dosis 5 µM Ti incrementó el Fe en 50 %, con respecto al testigo; y la dosis 10 µM Ti incrementó el Mn en 59 %. Se concluye que el Ti afecta de forma diferencial la concentración de micronutrimentos, dependiendo del cultivar y de la dosis aplicada.

INTRODUCCIÓN

México es octavo productor de caña de azúcar a nivel mundial (SIAP, 2021), lo que hace al cultivo de la caña el segundo rubro de mayor importancia después del maíz. En 2023, en el país se tuvo una molienda total de 47.5 millones de Mg de caña en verde, y se produjeron aproximadamente 5.3 millones de Mg de azúcar (MAM, 2024). Para el 2024, la producción nacional de caña de azúcar en verde fue de 55 millones de Mg en aproximadamente 800 000 ha; de las cuales se extrajo un estimado de 6 millones de toneladas de azúcar (CONADESUCA, 2024). Sin embargo, el sistema de cultivo necesita de innovaciones tecnológicas en términos de nutrición y bioestimulación, para lograr un sistema sostenible, ya que su rendimiento se ha visto afectado por factores como el cambio climático global (Demirel *et al*., 2024).

El titanio (Ti) es un metal de transición que ocupa por su abundancia el noveno lugar en la corteza terrestre. En suelos se puede encontrar en los minerales ilmenita, rutilo o anatasa. Las plantas pueden absorberlo y en la actualidad se considera un elemento benéfico capaz de mejorar procesos germinativos y promover la absorción nutrimental (Lyu *et al*., 2017; Carbajal-Vázquez *et al*., 2022). En hortalizas como el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo estrés salino, con la aplicación foliar de 0, 75 y 150 mg Ti L^{-1}, se observaron mejoras en la calidad de los frutos, aumentando la concentración de sólidos solubles totales y la acidez titulable (Carbajal-Vázquez *et al*., 2020); en

pseudocereales como el alforfón tártaro (*Fagopyrum tataricum* L), la aplicación de 56 mg Ti L^{-1}, incrementó el número de granos por planta en 46 % y el peso de grano por planta en un 37 %, atribuido a una mayor acumulación de auxinas y mejora en la fotosíntesis (Qi *et al*., 2024). En especies de la familia Poaceae, en arroz (*Oryza sativa* L.), con la aplicación de 50 mg Ti L^{-1}, se observaron incrementos en la longitud de raíces, en la altura de planta y en la biomasa fresca, bajo estrés por frío (Ullah *et al*., 2024). En trigo (*Triticum aestivum* L.), el Ti mejora propiedades fisiomorfológicas y bioquímicas en procesos germinativos, bajo condiciones de salinidad (Badshah *et al*., 2023) e induce tolerancia al estrés por salinidad, además de mejorar parámetros fisiológicos y bioquímicos (Mustafa *et al*., 2021). El objetivo del estudio fue analizar el efecto de la aplicación de Ti a yemas de dos cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290), en imbibición y asperjado al sustrato, en la concentración foliar de B, Cu, Fe, Mn y Zn.

TEORÍA

El Ti mejora aspectos fisiológicos, bioquímicos y biomoléculares en plantas. Por un lado, se ha registrado que el Ti promueve la elongación radical, la germinación y el crecimiento inicial, a través de una mayor absorción de macronutrimentos [nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg)], ya que el Ti aplicado vía radical, es altamente reactivo con los poros radicales, aumentando su porosidad y permitiendo el paso de agua y nutrientes (Carbajal-Vázquez *et al*., 2022; Alshegaihi *et al*., 2024).

Por otro lado, se ha reportado que dosis bajas de Ti mejoran el contenido de clorofila, ya que este promueve la síntesis de cofactores multimetálicos, así como proteínas metalodependientes como las fitoferritinas, las cuales almacenan Fe, elemento esencial en procesos fotosintéticos; el Fe participa de forma directa en la cadena de transporte de electrones (en la ferrodoxina y el citocromo f), generando energía (Doklega *et al*., 2022), lo que se ve relejado en mayor biomasa fresca y rendimiento.

Ante un factor de estrés, las plantas producen especies reactivas de oxígeno (ERO), provocando daño oxidativo a nivel celular; las ERO, afectan factores de transcripción implicados en la tolerancia al estrés. Es probable que el Ti module la expresión génica y permita el aumento de la actividad de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), la peroxidasa (POD) y la catalasa (CAT), contribuyendo a la estabilidad celular (Ullah *et al*., 2024).

PARTE EXPERIMENTAL

Dos cultivares de caña de azúcar (CP 72-2086 y Mex 69-290) fueron utilizados en esta investigación. Ambos cultivares se establecieron en una infraestructura para agricultura protegida, del tipo túnel con cobertura plástica y malla antiáfido en las laterales. De los tallos de caña de azúcar, se obtuvieron yemas con un tamaño de entre 7 y 8 cm de longitud, mismas que fueron colocadas en imbibición por 18 h en cada tratamiento con Ti (0, 5 y 10 μM, aplicado a partir de TiO_2). Después de la imbibición, las yemas se colocaron en contenedores plásticos (13 × 14 × 18.5 cm), previamente llenados con una mezcla de turba blanca (Super Terra ST1 Hawita) y tezontle (1:1; v:v).

La humedad del sustrato se mantuvo aplicando 200 mL de agua potable. Los tratamientos con Ti, se asperjaron directo al sustrato en intervalos de 10 d; se hicieron cinco aplicaciones. Transcurridos 60 después de la siembra, se cosecharon las plántulas y se procedió a secar las muestras en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, Guadalajara, Jalisco, México), por un lapso de 72 h a 70 °C.

De la biomasa seca obtenida, se pesaron 0.25 g y se colocaron en tubos de ensayo, a cada tubo conteniendo la muestra, se les agregó una mezcla de ácidos (H_2SO_4:$HClO_4$; 2:1; v/v) para realizar digestión húmeda (Alcántar & Sandoval, 1999). Una vez digestada la materia orgánica, se aforó la muestra a 25 mL con agua desionizada y se filtró. Los micronutrimentos B, Cu, Fe, Mn y Zn se determinaron a través de un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (Agilent ICP OES 725-ES; Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Con los resultados obtenidos, se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS

El Ti no tuvo efectos significativos en la concentración de B, Cu y Fe en caña de azúcar cv. CP 72-2086; sin embargo, 5 y 10 μM Ti disminuyeron significativamente las concentraciones de Mn (35 y 42 %) y Zn (43 y 33 %), con respecto a su testigo como se observa en la **Figura 1**.

Las concentraciones foliares de B y Cu obtenidas en nuestro estudio son consistentes con los resultados reportados en plántulas de caña de azúcar cv. CP 72-2086 crecidas en invernadero y tratadas por 60 días con la solución de Steiner al 100 %, las cuales, mostraron las siguientes concentraciones de micronutrimentos (en mg kg^{-1} de materia seca): B (24.6), Cu (7.6), Fe (132.6), Mn (212.7) y Zn (25.1); en tanto que, las concentraciones obtenidas en Fe, Mn y Zn estuvieron muy por debajo de los valores antes mencionados (Sentíes-Herrera, 2018).

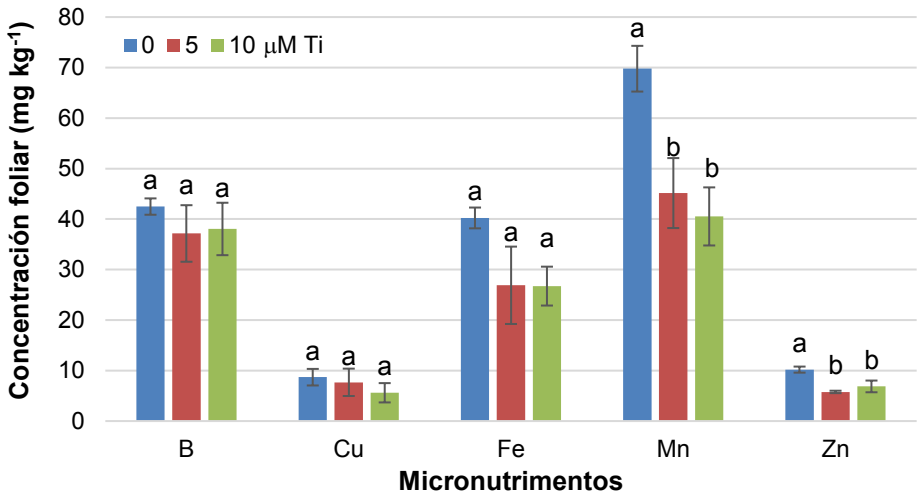


Figura 1. Concentración foliar de micronutrimentos en plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) cv. CP 72-2086 tratadas con distintas dosis de titanio (Ti). Medias ± DE con letras distintas en cada micronutrimento indican diferencias estadísticas entre los tratamientos en cada elemento (Tukey, $p \leq 0.05$).

Por otro lado, en la caña de azúcar cv. Mex 69-290, el Ti no afecta las concentraciones foliares de B, Cu y Zn; aunque la dosis 5 μM Ti incrementó el Fe en 50 %, con respecto al testigo; y la dosis 10 μM Ti incrementó el Mn en 59 % (**Figura 2**). En trigo (*Triticum aestivum* L.), la aplicación de Ti mitigó el estrés por Cu al regular los mecanismos de defensa antioxidante, lo que indica una posible interacción benéfica entre Ti y Cu en la planta, aunque no se reportaron incrementos en la concentración de Cu (Alshegaihi *et al*., 2024); de igual manera, este efecto fue observado en nuestro estudio, ya que en los resultados con ambos cultivares no se observaron incrementos significativos en la concentración de Cu, como se registra en las **Figuras 1** y **2**.

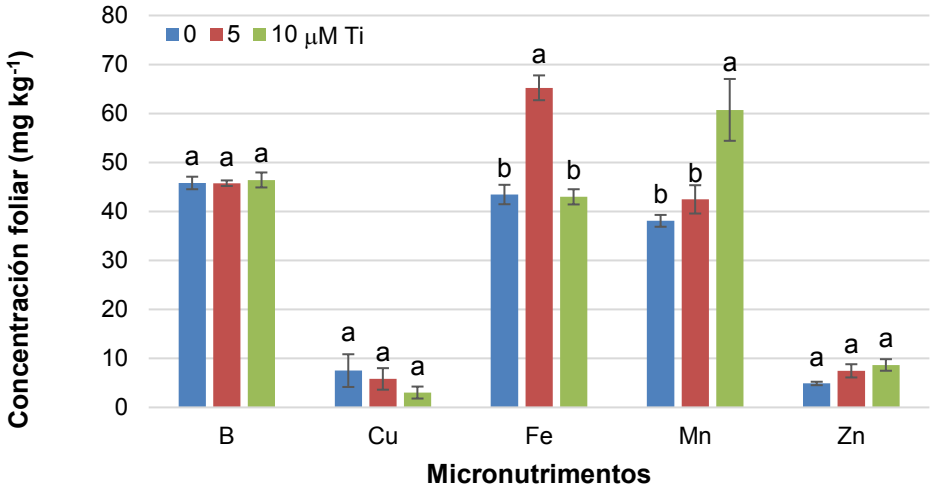


Figura 2. Concentración foliar de micronutrimentos en plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) del cv. Mex 69-290 tratadas con distintas dosis de titanio (Ti). Medias ± DE con letras distintas en cada micronutrimento indican diferencias estadísticas entre los tratamientos en cada elemento (Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

El uso de innovaciones tecnológicas en el sistema de producción caña de azúcar, permitirá mejoras en la optimización de insumos e incrementará tanto la calidad como el rendimiento del cultivo, todo ello con el fin de lograr la sostenibilidad del sistema. Concluimos que el Ti tiene efectos diferenciales en la concentración de micronutrimentos en las plántulas de caña evaluadas, dependiendo del cultivar.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Qi, Z. Wang, L. Jiang, Q. Wang, Y. Ren, C. Liang, Y. Wang, C. Liu, X. Ye, Y. Fan, Q. Wu, X. Wu, L. Peng, D. Xiang, L. Guo, G. Zhao, L. Zou, J. Huang, Y. Wan, "Physiological mechanisms of titanium regulation of growth, photosynthesis, and mineral absorption in tartary buckwheat", Agronomy, Vol. 14, 4, 2024, pp. 720-734.
2. I. Badshah, N. Mustafa, R. Khan,Z. Mashwani, N. I. Raja, M. H. Almutairi, L. Aleya, A. A. Sayed, S. Zaman, L. Sawati, Sohail, "Biogenic titanium dioxide nanoparticles ameliorate the effect of salinity stress in wheat crop", Agronomy, Vol. 13, 2, 2023, pp. 352-377.
3. CONADESUCA, "Programa Institucional 2020-2024 del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de azúcar" Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de azúcar. Consultado en línea el 26 de mayo de 2025; de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/622724/Programa_Institucional_2020-2024_del_Comite_Nacional_para_el_Desarrollo_Sustentable_de_la_Cana_de_Azucar_v2.pdf
4. G. Alcántar-González, M. Sandoval-Villa, Manual de análisis químico de tejido vegetal, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., Publicación Especial No. 10, 1999, Chapingo, México.
5. H. E. Sentíes-Herrera, "Innovaciones nutrimentales en la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.)", 2018. [Tesis doctoral, Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México], pp. 1-309.
6. MAM, "Manual Azucarero Edición 2024: Conectando a la Industria Azucarera Mexicana", Manual Azucarero Mexicano, Consultado en línea el 26 de mayo de 2025; de https://www.manualazucarero.com/

7. N. Mustafa, N. Raja, N. Ilyas, M. Ikram, Z. Mashwani, M. Ehsan, M. “Foliar applications of plant-based titanium dioxide nanoparticles to improve agronomic and physiological attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under salinity stress”, Green Process. Synth., Vol. 10, 1, 2021, pp. 246-257.
8. Ö. Demirel, H. Güneş, C. Can, “Sustainable and modern bio-based technologies: New approachs to food safety and security”, Environ. Dev. Sustain., 2024, pp. 1-28.
9. R. M. Alshegaihi, M. H. Saleem, A. Saleem, “Silicon and titanium dioxide mitigate copper stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through regulating antioxidant defense mechanisms”, *J. Plant Growth Regul*., Vol. 43, 2024, pp. 1519-1535.
10. S. M. A. Doklega, S. F. A. El-Ezz, N. A. Mostafa, E. S. Dessoky, A. M. Abdulmajeed, D. B. E. Darwish, F. M. Alzuaibr, A. A. El-Yazied, M. M. El-Mogy, S. F. M. Mahmoud, N. Taha, M. A. M. Abd El-Hady, “Effect of titanium and vanadium on antioxidants content and productivity of red cabbage”, Horticulturae, Vol. 8, 6, 2022, pp. 481-493.
11. S. Lyu, X. Wei, J. Chen, C. Wang, X. Wang, D. Pan, “Titanium as a beneficial element for crop production”, Front. Plant Sci., Vol. 8, 2017, 597-616.
12. S. Ullah, M. Ikram, J, Xiao, A. Khan, I. Din, J. Huang, “Influence of foliar application of nanoparticles on low temperature resistance of rice seedlings”, Plants, Vol. 13, 21, 2024, pp. 2949-2967.
13. SIAP, “Panorama agroalimentario”, Sistema de Información Agrícola y Pesquera (2021). Consultado en línea el 26 de mayo de 2025; de https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2021/Panorama-Agroalimentario-2021
14. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, E. G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, L. I. Trejo-Téllez, “Titanium increases the antioxidant activity and macronutrient concentration in tomato seedlings exposed to salinity in hydroponics”, Plants, Vol. 11, 8, 2022, pp. 1036-1053.
15. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, J. A. Herrera-Corredor, A. Contreras-Oliva, G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez, “Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions”, Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj-Napoca, Vol. 48, 2, 2020, pp. 924-937.

OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE BAGAZO DE AGAVE MEZCALERO

Jazmín Ramirez Ayala, Carmen Zulema Quiñones-Pérez, Karla María Ortega Valdez, Manuel Ismael Mata Escobedo, Edgar Gustavo López Saut

Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana.
m23790003@vguadiana.tecnm.mx

RESUMEN

El bagazo es un residuo sólido que se genera en la producción de mezcal, una vez que las piñas de agave han sido cortadas, cocidas y trituradas para extraer los azúcares fermentables[1]. Este material está compuesto por fibras lignocelulósicas, las cuales confieren estructura al cuerpo de la planta[2]. La valorización de la biomasa lignocelulósica se posiciona como una alternativa prometedora para enfrentar la crisis energética global y promover la sostenibilidad ambiental[3]. En este sentido, el carbón activado (CA) derivado del bagazo ha captado un creciente interés por sus múltiples aplicaciones, que abarcan desde la remediación ambiental y el almacenamiento de energía, hasta su uso como soporte en diversos procesos químicos. Dado que la biomasa está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, se considera una materia prima ideal para la fabricación de CA con propiedades deseables, como alta porosidad y extensa superficie específica[4,5]. Este enfoque no solo ofrece una alternativa más sostenible frente a las fuentes tradicionales de carbono, sino que también contribuye a la gestión de residuos mediante el aprovechamiento de subproductos agrícolas y forestales.

La metodología propuesta para la elaboración de CA a partir de fibras de bagazo de agave mezcalero, adapta y simplifica procedimientos existentes, tanto aquellos que utilizan materiales lignocelulósicos como materia prima, como los que emplean otras especies de agave. El proceso comenzó con el secado del bagazo previamente recolectado; una vez seco, se trituró hasta obtener partículas finas. A continuación, el material triturado se sometió a carbonización en crisoles de porcelana colocados en un horno de mufla estándar. El carbón resultante se dejó enfriar, se molió en un mortero y se sometió a una activación química. Posteriormente, se realizó una activación térmica introduciendo nuevamente el carbón en la mufla. Una vez enfriado y retirado del horno, el carbón se lavó con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzar un pH neutro, y finalmente se dejó secar al aire.

Para evaluar la calidad del carbón obtenido, se determinó el rendimiento de la carbonización del bagazo de agave y se realizaron pruebas de adsorción en el CA elaborado, utilizando una curva de calibración con naranja de metilo. Los resultados se compararon con muestras de CA comercial.

La metodología empleada para la elaboración de CA fue exitosa, logrando un material cuyas capacidades adsorbentes, según las pruebas realizadas, son comparables a las de los CA comerciales.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido en la demanda de mezcal ha impulsado la expansión de su producción en diversas regiones de México, generando también un aumento en la generación de residuos agroindustriales. Entre estos, el bagazo de agave, un residuo fibroso resultante de la cocción y molienda de las piñas de agave, representa uno de los subproductos más abundantes y problemáticos, tanto por su volumen como por la falta de estrategias sostenibles para su disposición final[1,6].

Ante este panorama, se vuelve prioritario el desarrollo de alternativas que permitan valorizar este residuo, transformándolo en insumos útiles para otras industrias. Una de las rutas más prometedoras es su uso como materia prima en la producción de carbón activado (CA), gracias a su naturaleza

lignocelulósica, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina[7,8]. Estos componentes favorecen la formación de estructuras carbonosas altamente porosas, con propiedades adsorbentes útiles para aplicaciones en el tratamiento de aguas, control de contaminantes y otros procesos industriales[9,5]. Este estudio tiene como propósito evaluar el bagazo de agave mezcalero como precursor en la obtención de carbón activado.

TEORÍA

El mezcal es una bebida alcohólica tradicional mexicana obtenida por la destilación de mostos derivados del tallo y base de las hojas de agave, conocidas como “piñas” o cabezas. Conforme a la NOM-070-SCFI-2016, los mostos deben someterse a fermentación alcohólica, permitiéndose hasta un 20% de azúcares añadidos sin afectar las características del producto. Actualmente, el mezcal cuenta con Denominación de Origen Mezcal (DOM) que abarca varios estados y municipios del país[10].

Durante su producción se generan residuos líquidos (vinazas) y sólidos (bagazo y pencas). En la última década, el auge del mezcal ha incentivado la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de estos residuos, no solo por responsabilidad ambiental, sino como una forma de agregar valor a la cadena productiva[11].

El bagazo es el residuo fibroso que queda tras cocer y triturar las piñas de agave para extraer los azúcares fermentables[1]. Está compuesto principalmente por fibras lignocelulósicas[2] con altos contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina[7,12,8], lo que lo convierte en un recurso atractivo para aplicaciones industriales. Su aprovechamiento ha sido explorado en diversos sectores: producción de biocombustibles[13,14,15], materiales de construcción[16,17,18], alimentación animal[19,20], sustratos hortícolas[21,22] y biorremediación[23,24]. Aun así, gran parte del bagazo aún es desechado inadecuadamente: se incinera, se entierra o se vierte en sitios clandestinos[25,26,6]. Esto genera preocupaciones ambientales que podrían mitigarse mediante su valorización.

El CA es un material amorfo con alto contenido de carbono, caracterizado por su elevada porosidad y gran superficie específica[27,28]. Estas propiedades le confieren una notable capacidad adsorbente, lo cual lo hace útil en tratamientos de agua, purificación de gases y procesos industriales.

El interés por producir CA a partir de residuos lignocelulósicos ha crecido en los últimos años debido a sus aplicaciones en remediación ambiental, almacenamiento de energía y química verde[9,4,5]. Esta estrategia no solo aprovecha subproductos agrícolas, sino que ofrece una alternativa sustentable frente al uso de fuentes tradicionales de carbono.

PARTE EXPERIMENTAL

El proceso comenzó con el secado del bagazo previamente recolectado, el cual se expuso al sol durante una semana. Una vez seco, se trituró hasta obtener partículas de aproximadamente 1 cm de longitud. El material triturado se colocó en crisoles de porcelana y se sometió a una carbonización térmica en un horno tipo mufla, bajo condiciones controladas. Finalizada esta etapa, el carbón obtenido se dejó enfriar a temperatura ambiente y fue pulverizado en un mortero. Para la activación química, el carbón molido se colocó en vasos de precipitados y se cubrió completamente con una solución de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85% v/v. La mezcla se dejó reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se procedió al filtrado por vacío utilizando papel filtro, y el ácido recuperado se almacenó para su posible reutilización. El residuo sólido fue secado en estufa a temperatura media y sometido a una activación térmica secundaria en la mufla. Finalmente, el CA se lavó con una solución diluida de hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzar pH neutro, con el fin de eliminar residuos ácidos. El producto final se secó al aire en una campana de flujo laminar y se almacenó en condiciones secas para su posterior caracterización.

Para evaluar la capacidad adsorbente del CA obtenido, se prepararon soluciones estándar de naranja de metilo con concentraciones conocidas. A partir de estas soluciones, se construyó una

curva de calibración utilizando espectrofotometría UV-Vis. En cada ensayo, se colocaron 0.5 g del CA en un tubo de ensayo junto con 25 mL de la solución de colorante a una concentración conocida. La mezcla fue sometida a agitación manual. Este procedimiento se repitió por triplicado.

Tras la exposición, el sistema fue filtrado utilizando papel filtro de 120 mm de diámetro, y el filtrado fue recolectado para su análisis espectrofotométrico, utilizando celdas de cuarzo. Como referencia comparativa, se replicó el procedimiento experimental utilizando un carbón activado comercial, con el fin de contrastar su eficiencia de adsorción frente al material elaborado a partir del bagazo de agave mezcalero.

RESULTADOS

Para evaluar el rendimiento de la carbonización del bagazo de agave, se calculó dividiendo la cantidad de carbón vegetal obtenido entre la cantidad de material inicial (bagazo de agave), ambos expresados en términos de peso seco y multiplicando el resultado por 100. Este análisis arrojó que el carbón vegetal producido alcanzó un rendimiento de carbonización del 33.71%.

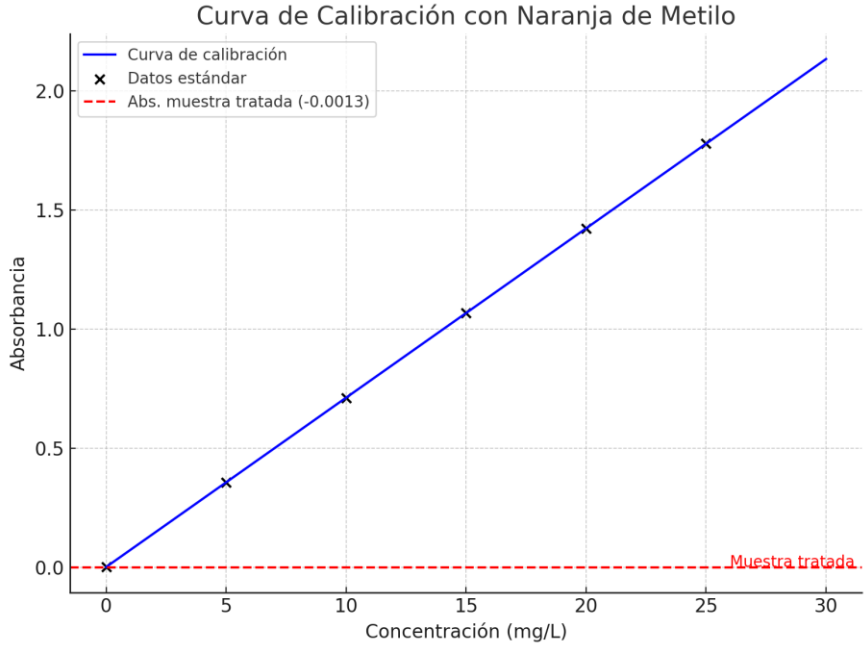
Este valor se encuentra dentro del rango superior reportado[29], quienes indican que, en sistemas donde no se recuperan los gases producidos durante la carbonización, como en el presente estudio, los rendimientos suelen oscilar entre el 15% y el 35% en base anhidra. Lo anterior sugiere que el procedimiento empleado fue eficiente y adecuado para este tipo de biomasa.

Se preparó una curva de calibración con soluciones estándar de Naranja de Metilo. La relación entre concentración (mg/L) y absorbancia fue lineal, con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{y = 0.0711x + 0.0007}$$

$$\boldsymbol{R^2 = 0.998})$$

En la Gráfica 1 la línea roja representa la absorbancia de la muestra tratada (CA), indicando que la concentración final del colorante en solución fue cercana a cero o incluso menor que el blanco, lo cual sugiere adsorción completa por el carbón activado.



Gráfica 1. Curva de Calibración de Naranja de Metilo.

Para evaluar el desempeño del CA y CA comercial se utilizaron dos parámetros fundamentales: la capacidad adsorbente y el porcentaje de remoción del colorante naranja de metilo. Ambos valores se determinaron a partir de la concentración inicial y final del colorante, las cuales fueron calculadas

con base en la absorbancia registrada por espectrofotometría y la curva de calibración previamente establecida.

La Tabla 1 muestra una comparación entre los datos obtenidos del carbón activado sintetizado mediante la metodología propuesta y los correspondientes al carbón activado de origen comercial.

Tabla 1. Comparativa entre carbón activado experimental y comercial.

Tipo de CA	Concentración final (mg/L)	Cantidad adsorbida (mg/g)	Eficiencia de remoción (%)
Experimental	0.0000	1.250	100.00
Comercial	0.0408	1.248	99.84

CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que es posible aprovechar el bagazo de agave mezcalero como materia prima para la elaboración de CA, obteniendo un material con propiedades adsorbentes comparables a las de productos comerciales. El CA experimental logró una remoción del 100% del Naranja de Metilo, según análisis espectrofotométrico. La capacidad adsortiva fue de 1.25 mg/g. No obstante, se recomienda estandarizar el proceso de producción, así como repetir las evaluaciones en diferentes condiciones experimentales. Adicionalmente, es fundamental realizar una caracterización físico-química más profunda del CA obtenido (como análisis de superficie específica, tamaño de poro y grupos funcionales) para comprender mejor su comportamiento adsortivo y explorar nuevas aplicaciones.

Agradecimientos
A la mezcalera Tradiciones Mezcaleras S.P.R. de R.L., al Laboratorio Nacional CONAHCYT de Biocombustibles Sólidos (BIOENER) (ApoyoLNC-2023-40), al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM).

BIBLIOGRAFÍA

1. Diaz, S. P. (2022). Residuos de agave en el proceso de producción de mezcal artesanal en el valle de Tehuacán-Cuicatlán.
2. Velázquez, A. (2019). Producción de hojas de papel a partir de la pulpa de bagazo de agave espadín (Angustifolia Haw). Tesis de Ingeniería. Facultad de estudio superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Sun, Z., Bottari, G., Afanasenko, A., Stuart, M., Deuss, P., Fridrich, B., & Barta, K. (2018). Complete lignocellulose conversion with integrated catalyst recycling yielding valuable aromatics and fuels. Nature Catalysis, 1(1), 82-92. https://doi.org/10.1038/s41929-017-0007-z
4. Puligundla, P., Oh, S., & Mok, C. (2016). Microwave-assisted pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass to sugars and ethanol: a review. Carbon Letters, 17(1), 1-10. https://doi.org/10.5714/cl.2016.17.1.001
5. Contescu, C., Adhikari, S., Gallego, N., Evans, N., & Biss, B. (2018). Activated carbons derived from high-temperature pyrolysis of lignocellulosic biomass. C – Journal of Carbon Research, 4(3), 51.
6. Flores-Ríos, P. A., Celerino, R., & Castañeda-Hidalgo, E. (2020). Generación y caracterización básica de bagazos de la agroindustria del mezcal en Oaxaca. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(6), 1437-1445.
7. Hidalgo-Reyes, M., Caballero-Caballero, M., Hernández-Gómez, L. H., & Urriolagoitia-Calderón, G. (2015). Chemical and morphological characterization of Agave angustifolia bagasse fibers. Botanical Sciences, 93(4), 807-817.
8. Flores-Trujillo, A.K.I., Mussali-Galante, P., de Hoces, M. C., Blázquez-García, G., Saldarriaga-Noreña, H.A., Rodríguez-Solís, A., Tovar-Sánchez, E., Sánchez-Salinas, E. &

Ortiz-Hernández, L. (2020). Biosorption of heavy metals on *Opuntia fuliginosa* and *Agave angustifolia* fibers for their elimination from water. International Journal of Environmental Science and Technology, 18, 441–454.
9. Nor, N., Lau, L., & Lee, K. (2013). Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control—a review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1(4), 658-666.
10. COMERCAM. Informe Estadístico (2024). Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A. C.: Oaxaca, México, 2024; Available online: https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf
11. Sánchez-Carmona, A., Magaña, G., Amaya-Delgado, L., & Arreola-Vargas, J. (2017). Aprovechamiento Sustentable de Residuos y Subproductos. Panorama del Aprovechamiento de los Agaves en México. AGARED, 221.
12. Meza, L. (2018). Biorrefinería del bagazo de *Agave tequilana*: extracción de lignina por diferentes pretratamientos y producción de metano. Tesis de maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
13. Yan, X., Tan, D., Inderwildi, O., Smith, J., & King, D. (2011). Life cycle energy and greenhouse gas analysis for agave-derived bioethanol. Energy & Environmental Science, 4(9), 3110.
14. Mielenz, J., Rodríguez, M., Thompson, O., Yang, X., & Yin, H. (2015). Development of agave as a dedicated biomass source: production of biofuels from whole plants. Biotechnology for Biofuels, 8(1).
15. Flores-Gómez, C. A., Escamilla Silva, E. M., Zhong, C., Dale, B. E., da Costa Sousa, L., & Balan, V. (2018). Conversion of lignocellulosic agave residues into liquid biofuels using an AFEX™-based biorefinery. Biotechnology for biofuels, 11, 7.
16. Garza-Elizondo, G. (2016). Transformación del bagazo de agave para el desarrollo de nuevos materiales (Doctoral disertación, Universidad Autónoma de Nuevo León).
17. Santiago-Mateo, P., Velázquez-Sánchez, R. M., Gómez-Velázquez, J., & Ramos-Flores, A. (2021). Adobes Sustentables a Partir De Los Desechos De La Producción De Mezcal (Financial Viability of Sustainable Adobes from Waste within the Mezcal Industry. The Case of “El Rey De Matatlán” in Oaxaca, México). Revista Global de Negocios, 9, 45-59.
18. Serrano, M. (2024). Del agave a la arquitectura en tierra. aprovechamiento de fibras naturales de los desechos de la agroindustria en la fabricación del adobe biocompósito. Ge-Conservación, 25(1), 44-52.
19. Ramírez-Cortina, C., Alonso-Gutiérrez, M., & Rigal, L. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente, 18(3), 449-457.
20. Ruíz, L., Valenzuela, R., Ibarra, E., Bañuelos, H., Arellano, F., & Reyes, A. (2018). Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de agave como alternativa de alimento para rumiantes. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas, (11), 2099-2103.
21. Morán-Salazar, R. G., Marino-Marmolejo, E. N., Rodríguez-Campos, J., Dávila-Vázquez, G., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Use of agave bagasse for production of an organic fertilizer by pretreatment with *Bjerkandera adusta* and vermicomposting with *Eisenia fetida*. Environmental technology, 37(10), 1220-1231.
22. González, M., Eguiarte, D., Macías, R., Salcido, L., Laborde, J., & Morán, J. (2018). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas, 4(8), 1161-1173.
23. Tovar-Corona, A., Vázquez-Cuchillo, O., Moreno-Luna, F., & Hernández-Tosca, D. (2016). Sistema biotecnológico para reducción de cromo (vi) en aguas residuales. Tópicos De Investigación en Ciencias De La Tierra Y Materiales, 3, 163-174.
24. Sánchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benítez, F. J., & Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 23( ), 1-18.
25. Rosete, B. (2009). Propuesta de un sistema de desmedulado para la obtención de fibra de bagazo de agave tomado de los desechos de las fábricas tequileras de Arandas Jalisco.

Tesis de licenciatura para obtener el título de ingeniero mecánico. Escuela Superior de Ingeniería M.
26. Flores, R. P. A.; Robles, P. C. y Hernández, A. 2013. Prospección de la producción de residuos en la agroindustria mezcalera de Santiago Matatlán, Oaxaca. In: Novenas Jornadas Politécnicas de Investigación en Ciencias y Tecnología. CIIDIR-IPN-Oax. CD Rom. 85 p.
27. Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). Activated carbon adsorption. CRC press.
28. Fernández Macedo, A. M. (2022). Adsorción de complejos aniónicos Au (CN) 2-en carbón activado generado a partir de biomasa bagazo de agave. Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo.
29. El Bassam, N., & Maegaard, P. (2004). Integrated renewable energy for rural communities: Planning guidelines, technologies and applications. Elsevier.

GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE JITOMATE (*Solanum Lycopersicum L.*) BAJO LUZ FLUORESCENTE

Brenda Ramos Rocha, Jesús Castañeda Contreras, María de los Ángeles Sotelo Olague, Sofía Loza Cornejo.

Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara
Brenda.rrocha@alumnos.udg.mx

RESUMEN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor demanda alimenticia, por lo que es de gran importancia buscar nuevas técnicas de cultivo donde se pueda tener un mayor éxito y calidad de su cultivo. La luz no es solamente una fuente de energía, sino que está directamente relacionada con el crecimiento de la planta. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la luz fluorescente en la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas de *Solanum lycopersicum* L. Para llevar a cabo esta investigación se adquirieron semillas de jitomate de manera comercial, las cuales fueron seleccionadas, desinfectadas y sembradas en bolsas de cierre hermético estériles y con la adición de agua destilada. Las bolsas completamente cerradas (4 repeticiones de 25 semillas cada una) se etiquetaron para recibir el tratamiento correspondiente (luz fluorescente) y el control (invernadero). Para el tratamiento con luz fluorescente se colocaron en anaqueles de metal bajo paneles que incluyeron 21 focos de luz fluorescente. Para el control las bolsas se colocaron también en un anaquel dentro de un invernadero. Las variables evaluadas en la germinación fueron: velocidad de germinación, porcentaje, tiempo medio de germinación y frecuencia de germinación. Las plántulas resultantes de ambos tratamientos (luz fluorescente-control) se sembraron en macetas de plástico de 7 pulgadas con sustrato consistente de musgo. Al término del experimento (45 días), se registraron las variables morfológicas de las plantas: número de hojas, diámetro de tallo, índice de robustez, longitud de la hoja, altura parte aérea, altura total, longitud de la raíz, utilizando un vernier digital; el índice de contenido de clorofila (ICC) se midió con un equipo portátil. Se obtuvieron los parámetros de la estadística descriptiva y se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey. Los resultados demostraron diferencias estadísticas significativas en el porcentaje de germinación, ya que el porcentaje de germinación fue mayor (71.5±2.96%) en el tratamiento con luz fluorescente, mientras que en el control la media fue de 55.25 ± 7.53% de semillas germinadas. También destaca la velocidad máxima de germinación en el día 6 en el tratamiento con luz fluorescente. En cuanto a las variables morfológicas, la que destaca del tratamiento con luz fluorescente, es el diámetro del tallo con una media de 13.57±7.0 mm, mientras que en el invernadero el diámetro del tallo fue de 6.39±0.93 mm; sin embargo, no se registraron diferencias estadísticas significativas. De acuerdo con los resultados de la variable fisiológica el ICC es mayor en plantas crecidas bajo luz fluorescente, con una media de 6.49±0.90 ICC. Se concluye que el tratamiento de luz fluorescente favorece la velocidad y el porcentaje de germinación de semillas de jitomate.

INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) es una de las hortalizas de gran demanda alimenticia, por lo que su cultivo tiene mayor importancia para el consumo humano. Sin embargo, al igual que en otros cultivos de interés alimenticio se buscan nuevas técnicas que sean más rentables y se obtenga mayor producción o un menor tiempo de crecimiento. La luz para las plantas no es solamente una fuente de energía, sino que es un factor importante para su crecimiento, ya que por medio de sus fotorreceptores, como los fitocromos, criptocromos y fototropinas, que se activan bajo diferentes longitudes de onda, se hace más eficiente la captación de la energía lumínica, lo cual tiene como resultado un mejor desarrollo y crecimiento de las plantas (Y., 2010) (Liu, 2012).

TEORÍA

El nombre científico del jitomate fue asignado por Karl Von Linnaeus, en 1753 como *Solanum lycopersicum L.* Es una planta perenne, se cultiva anualmente y puede ser erecta o semierecta.

Sistema radical

Está constituido por la raíz principal, las raíces secundarias y raíces adventicias. Se encuentra a 1.5 m de profundidad y la mayor parte a 50 cm.

Tallos

Al inicio el tallo es frágil, herbáceo y pubescente, con el tiempo se vuelve semi leñoso con pelos glandulares. En el primer periodo de crecimiento es erecto y luego por su propio peso la planta se hace decumbente y puede llegar a postrarse.

Hojas

Los cotiledones son fusiformes agudos, las primeras hojas son simples y las posteriores son compuestas, alternas pinatisectas con 7 o 9 foliolos. Tienen bordes aserrados y presentan tricomas.

Flores

Se encuentran en diferentes pisos o verticilos con 3 a 10 flores por inflorescencia. La inflorescencia del jitomate es una cima iniciada por el meristemo apical y está formada por un eje principal y flores laterales sin brácteas. Las flores se abren sucesivamente por lo que pueden encontrarse flores y frutos en la misma inflorescencia. La flor es de color amarillo en forma de estrella y tiene seis pétalos, usualmente tienen 6 estambres cuyas anteras amarillas están unidas para formar un tubo, alrededor de estas se encuentra el pistilo. Son hermafroditas, se auto fecundan (Velazquez, 2019).

Fruto

El fruto de esta planta es una baya suculenta de color rojo o amarillo de forma globular, dividida en su interior por 18 lóculos. Tiene un diámetro de 3 a 16 cm. Su superficie es lisa y brillante al madurar.

Semilla

Tiene de diámetro de 3 a 5 mm, es reniforme aplastada, de color marrón claro y recubierta de pelos. Constituida por el embrión, endospermo y testa (Velazquez, 2019).

Luz fluorescente

La luz fluorescente es adecuada para el crecimiento, se recomienda en las primeras etapas de crecimiento. Las lámparas fluorescentes emiten más luz en longitudes de onda en azul, rojo y rojo lejano. Emiten luz difusa que penetra mejor en el dosel vegetal, incrementando de esta forma, la fotosíntesis (Li, (2015) (Runkle, 2012) (Snowden, 2016) (Zazueta Torres, 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención del material

Las semillas se obtuvieron de manera comercial, de la marca “Tomate Rio Fuego” (*Solanum lycopersicum L.*). se observaron en el estereoscopio para seleccionar las semillas que no presentaran daños. Se separaron en grupos de 100 semillas cada uno.

Tratamiento pre-germinativo

Se seleccionaron dos grupos de semillas cada uno, como se describe en el esquema de la figura 1:

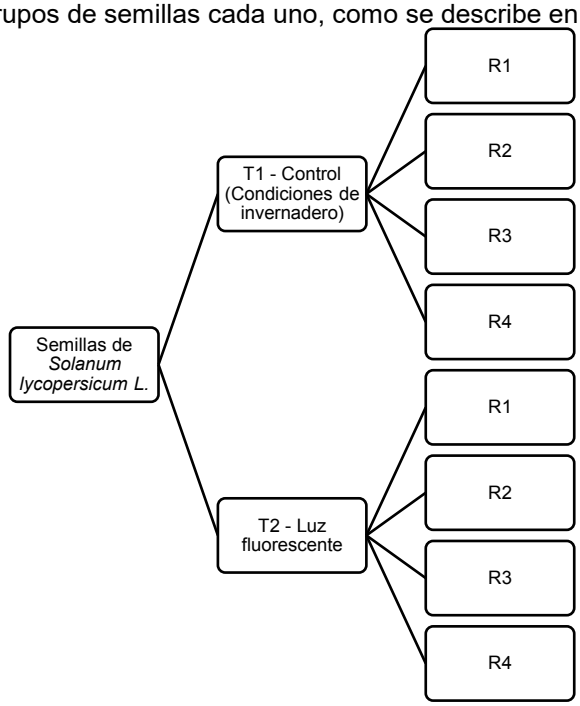


Figura 1. Diagrama del diseño experimental.

Desinfección de semillas

Las semillas se desinfectaron en hipoclorito de sodio al 10% durante 15 minutos con un agitador orbital. Posteriormente se enjuagaron con agua destilada varias veces, hasta eliminar el exceso de cloro.

Germinación

Las semillas se colocaron sobre papel filtro dentro de bolsas herméticas, se les agrego agua destilada y se cerraron. Una vez sembradas las semillas se colocaron en cada uno de los tratamientos. El control fue llevado al invernadero del Centro Universitario de los Lagos (CULagos). El tratamiento con estrés lumínico (luz fluorescente), se realizó en el laboratorio de Fitoquímica, utilizando un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas oscuridad, en anaqueles de metal con paneles de luz que incluyeron 21 focos fluorescentes. Durante esta etapa se registraron los resultados cada tercer día.

Figura 2. Semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) en bolsas herméticas para germinar. A: Control; B: Luz fluorescente.

Fórmulas para evaluar parámetros de germinación

En cada conteo el criterio de germinación fue la ruptura de la testa y la aparición de la radícula, con longitud igual o mayor a 2 mm (Hall, 1990).

Velocidad de germinación

$$\boldsymbol{VG} = \frac{\boldsymbol{SG(1)}}{\boldsymbol{1}} + \frac{\boldsymbol{SG(2) - SG(1)}}{\boldsymbol{2}} + \cdots + \frac{\boldsymbol{SG(n) - SG(n-1)}}{\boldsymbol{n}} \quad (\boldsymbol{1})$$

$SG(n) =$ Número de semillas germinadas al conteo n

Porcentaje de germinación

$$\% = \left(\frac{\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{A}}\right) * \boldsymbol{100} \quad (\boldsymbol{2})$$

$n =$ Número de semillas germinadas al final de la prueba

$A =$ Número total de semillas colocadas para germinar

Tiempo medio de germinación

$$\boldsymbol{MGT} = (\sum \boldsymbol{ni\ ti}) / \sum \boldsymbol{ni} \quad (\boldsymbol{3})$$

$ni =$ Numero de semillas germinadas al día i

$ti =$ Tiempo de incubación

$i =$ 3 a 30 dias

Unidad: días

Frecuencia de germinación

$$Frecuencia = XiXn \quad (4)$$

$Xi =$ semillas germinadas por día de revisión

$Xn =$ Número total de semillas germinadas el último día de control

Crecimiento de plántulas

Las plántulas obtenidas se sembraron en macetas de 7 pulgadas, cada una de las plántulas continuó con su tratamiento de luz correspondiente.

Variables morfológicas

Se llevó a cabo un registro de algunas variables morfológicas con ayuda de un vernier digital y una cinta métrica para comparar cambios en los tratamientos. Las variables registradas fueron: altura de la parte aérea, longitud de las hojas, diámetro del tallo, numero de hojas, longitud de la raíz. Las mediciones se registraron en un grupo de n=10 plántulas, en cada uno de los dos tratamientos.

Índice de robustez

Donde se relaciona la altura (cm) y el diámetro del cuello de la raíz (mm) de la planta (Saenz, 2010).

$$IR = \frac{Altura\ (cm)}{Diametro\ cuello\ de\ la\ raíz\ (mm)}$$

RESULTADOS

El porcentaje total de germinación se muestra en la Tabla 1. Se puede observar que el tratamiento 2 obtuvo un valor más alto con 71.5% de semillas germinadas.

Tabla 1. Porcentaje de germinación total de cada tratamiento. Los datos representan la media ± el error estándar (n=4 repeticiones).

Tratamiento	Porcentaje de germinación total (%)
T1- Control	55.25 ± 7.53
T2- Luz Fluorescente	71.5 ± 2.96

La velocidad de germinación provee una medida del tiempo de germinación en relación con la capacidad de germinación; es decir, refleja el tiempo que necesitan las semillas para germinar, donde al igual que en el porcentaje de germinación, registró un valor más alto con la luz fluorescente, obteniendo mayor conteo al sexto día del experimento. En las figuras 3 a 5 se muestran los resultados de las variables frecuencia de germinación y velocidad de germinación, respectivamente.

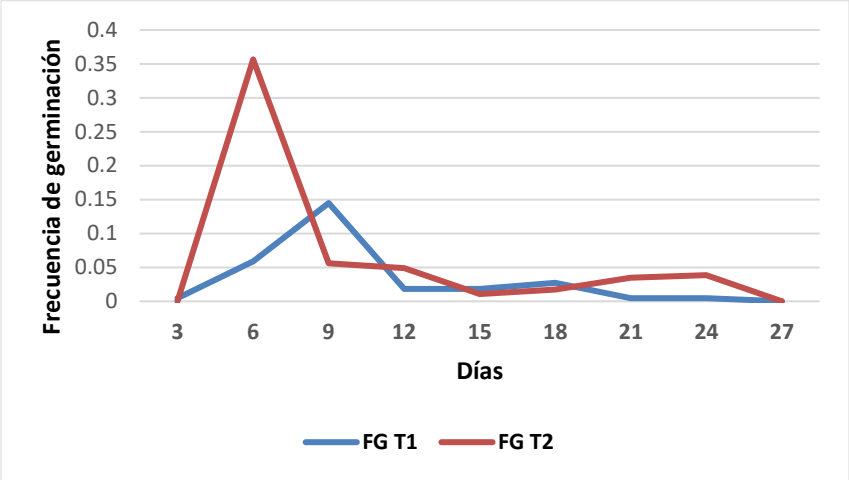


Figura 3. Frecuencia de germinación de semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). Los datos representan la media (n=4 repeticiones).

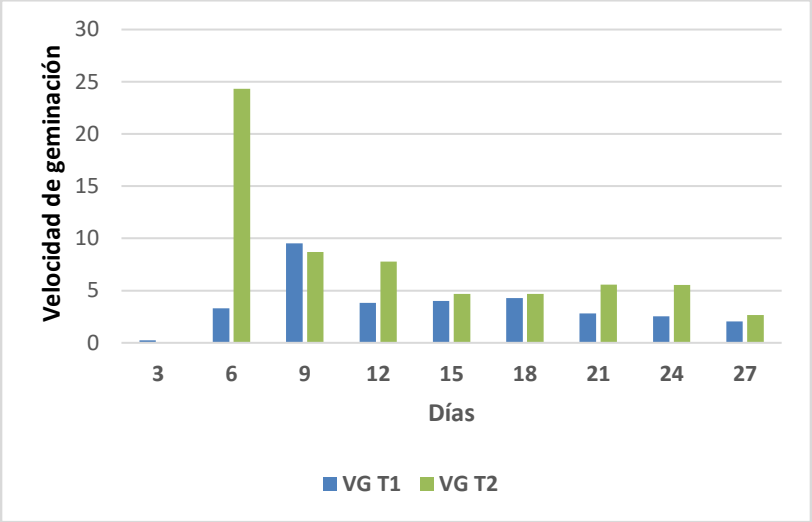


Figura 4. Velocidad de germinación de semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). Los datos representan la media (n=4 repeticiones).

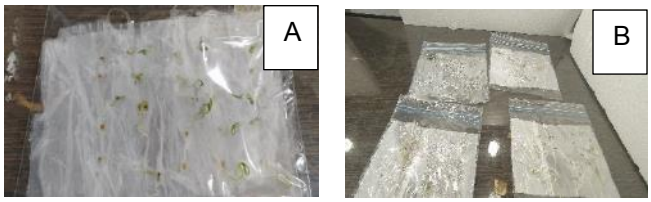


Figura 5. Semillas germinadas, en cada uno de sus tratamientos. A: Control; B: Luz fluorescente.

Caracteres morfológicos de las plántulas de jitomate

En cuanto a la morfología de las plántulas o germinados de jitomate provenientes de cada tratamiento, son evidentes las diferencias en tamaño, como se muestra en la Figura 6.

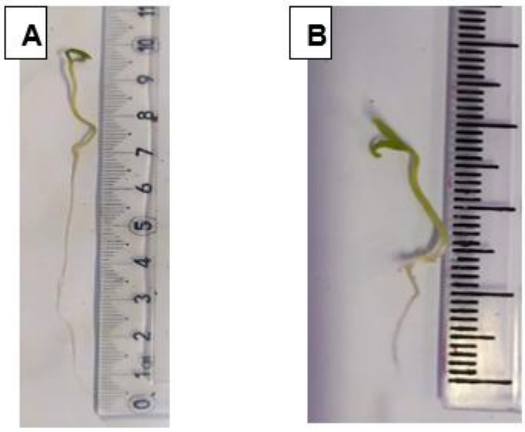


Figura 6. Germinados de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). **A:** Control; **B:** Luz fluorescente.

Los resultados cuantitativos de las variables morfológicas de plántulas de jitomate obtenidas de los dos tratamientos se muestran en la Tabla 2.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los caracteres morfológicos, los promedios donde el tratamiento 2 de luz fluorescente, obtuvo beneficios y mejor promedio que el control son las variables de diámetro de tallo, donde se observa que los tallos fueron más gruesos en el T2, y la otra variable con mejor resultado fue el contenido de clorofila (Tabla 2).

Para las demás variables de altura parte aérea, número de hojas, índice de robustez, longitud de la hoja, altura total y raíz, obtuvieron mejores valores en el control (Tabla 2; Figura 7).

Tabla 2. Comparación de caracteres morfológicos de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.)* provenientes del tratamiento luz fluorescente *vs.* Control.

Variable morfológica	Control	Luz Fluorescente
Altura parte aérea (cm)	9.12 ± 3.33 [a]	7.18 ± 2.05 [a]
Número de hojas	16.40 ± 2.71 [a]	9.14 ± 2.94 [a]
Diámetro de tallo (mm)	6.39 ± 0.93 [a]	13.57 ± 7.06 [a]
Índice de robustez	1.45 ± 0.43 [a]	0.73 ± 0.19 [a]
Longitud de hoja (mm)	36.01 ± 4.75 [a]	17.55 ± 5.09 [a]
Altura total (cm)	47.25 ± 6.14 [a]	36.66 ± 6.18 [a]
Raíz (cm)	19.82 ± 4.14 [a]	18.25 ± 2.86 [a]
Índice de contenido de clorofila (ICC)	6.30 ± 0.69 [ab]	6.49 ± 0.90 [a]

Los datos representan la media ± el error estándar. Letras superíndices diferentes en cada renglón indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p<0.5$).

Figura 7. Plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.)*, en cada uno de sus tratamientos. **A**: Control; **B**: Luz fluorescente.

CONCLUSIÓN

El tratamiento con luz fluorescente superó el porcentaje de germinación obtenido en comparación con el tratamiento control T1. La frecuencia de germinación fue mayor en el día 6 con luz fluorescente. La bioestimulación con luz fluorescente fue favorable durante el tiempo de germinación hasta el desarrollo del epicótilo (tallo); de igual manera fue notorio el incremento del contenido de clorofila. Referente a los caracteres morfológicos, en la estadística de Tukey no se demostró algún cambio significativo para los parámetros cuantitativos.

BIBLIOGRAFÍA

Hall, R. y. (1990). Relationship between seed vigor test and field performance of "Regar" Meadow Bromegrass. *Crop Science*, 967-970.

Li, T. a. ((2015).). *Advantages of diffuse light for horticultural production and perspectives* . . Obtenido de Retrieved from Plant Sci.: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00704

Liu, W. (2012). Light Environmental Management for Artificial Protected Horticulture. *Agrotechnology*, 1-4.

Runkle, E. S. (2012). Replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps may delay flowering. *Sci. Hortic.*

Saenz, R. J. (2010). Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacan. En *En Folleto Tecnico Num. 17* (pág. 48). Uruapan, Michoacan, Mexico .

Snowden, M. C. (2016). Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: interactions with photon flux. *PLoS One*. Obtenido de PLoS One : http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0163121

Velazquez, M. I. (2019). *Evaluacion del rendimiento y calidad del tomate (Solanum lycopersicum L.) con fertilizacion biologica en invermadero.* Coahuila, Mexico.

Y., D. a. (2010). Effects of a new light source (cold cathode flourescent lamps) on the growth of tree peony plantlets in vitro. *Scientia Horticulturae*, 165-169.

Zazueta Torres, N. D. (2022). Calidad de luz de lamparas fluorescentes en el crecimiento de pepino y severidad de Oidium sp. . *Revista Mexicana de Ciencias Agricolas.*, 977-989.

EVALUACIÓN DE *Clavispora Lusitanea* Y35 EN LAS LINEAS PARENTALES DE MAÍZ B41 Y B51

Zoe Resendiz-Venado[1], Lily X. Zelaya-Molina[2], Virginia Villa-Cruz[1], Juan Ramos-Garza[3], Esmeralda Plascencia-Ulloa[2], Edgardo Bautista-Ramírez[4], Ismael F. Chávez-Díaz[2], Rita J. Patakfalvi[1].

[1]Centro Universitario de Los Lagos-UdG, Av. Enrique Díaz de León 1144, Col. Paseos de la Montaña, Lagos de Moreno, C.P. 47460, Jalisco. [2]Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP, Blvd. de la Biodiversidad No. 400, Tepatitlán de Morelos, C.P. 47600, Jalisco, México. [3]Universidad del Valle de México-Campus Coyoacán, Calz. de Tlalpan 3016/3058, Ex-Hacienda Coapa, Coyoacán, 04980, Ciudad de México. [4]Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-CIRPAC-INIFAP, Blvd. de la Biodiversidad No. 2470, Tepatitlán de Morelos C.P. 47600, Jalisco.
zoeresendizvenado@gmail.com.

RESUMEN

En el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se han generado líneas de progenitores de hembras y machos de varios híbridos de maíz, los cuales se consideran una opción tecnológica para los productores de maíz de las regiones subtropicales de México. Estos híbridos aumentan la productividad y rentabilidad de su sistema de producción; sin embargo, las líneas parentales B51 y B41 presentan problemas de germinación y vigor cuando se obtienen semillas de estas líneas por autofecundación. No obstante, los tratamientos con microorganismos promotores de crecimiento vegetal tienen un elevado potencial para ser empleadas en al ámbito agrícola debido a que presentan actividades que favorecen al cultivo. Es por esto que el objetivo de este estudio fue determinar el potencial de promoción de germinación de *Clavispora lusitanea* Y35 sobre las líneas parentales de maíz B41 y B51. Las semillas utilizadas fueron cosechadas bajo diferentes métodos de polinización: planta a planta (PaP), autofecundación y fraternal, y se trataron con una suspensión de la cepa Y35 a diferentes concentraciones ($1x10^8$, $1x10^9$ y $1x10^{10}$ UFC). La prueba se realizó mediante una prueba de germinación estándar y se analizaron los parámetros de germinación: longitud de planta (PL), y raíz (RL), número de raíces (NR); así como peso fresco y seco de la parte aérea (PPF y PPS) y raíz (PFR y PRS) de las plántulas. Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de componentes principales (PCA) y un ANOVA. Los resultados mostraron una gran variabilidad en las tres concentraciones evaluadas (40.9% en $1x10^8$, 46.4% en $1x10^9$ y 36.1% en $1x10^{10}$). Los PCA de las tres concentraciones mostraron los que los parámetros de germinación LR, NR, PSR y PFR se incrementaron en mayor medida en las plántulas de la línea parental B-51 sobre todo en polinización fraternal y autofecundación, y cuando son tratadas con suspensión de Y35. Es por eso que *Clavispora lusitanea* Y35 puede aumentar la promoción de crecimiento vegetal a concentraciones de $1x10^8$-$1x10^9$.

INTRODUCCIÓN

En México, el proceso de domesticación y mejoramiento del maíz continúa en el presente, ya que los agricultores indígenas y mestizos del país cultivan, seleccionan, guardan y usan su propia semilla de maíz año con año. El maíz es el rubro de mayor importancia dentro de la canasta alimenticia básica según FAO. Para México, la importancia del maíz radica en que constituye la base alimenticia tanto de su población rural como urbana (CONABIO, 2012). En 2022 se sembraron 6.9 millones de hectareas de maíz y se obtuvo una producción en promedio de 26 millones de toneladas con un valor de 6,500 pesos por tonelada (SIAP, 2023).

En la producción de maíz, como en cualquier otro cultivo, la semilla es el principal insumo, ya que de ella dependen el potencial de rendimiento y la calidad del producto (Sierra-Macías et al., 2016). La semilla se obtiene del fruto, después de la fecundación de la flor, los frutos o partes de éstos, así como partes de vegetales o vegetales completos que se utilizan para la reproducción y propagación de las diferentes especies vegetales (DOF, 2007). Otros puntos importantes a considerar en la

producción y rendimiento de un cultivo son la germinación y el vigor de las semillas. Se denomina germinación a una serie de procesos que se producen en la semilla desde que el embrión comienza a crecer, hasta que se ha formado una pequeña planta que puede vivir por sí misma, independiente de los nutrientes almacenados en la semilla. Para que tenga lugar la germinación tiene que reunirse una serie de condiciones, tanto en la semilla como en el ambiente que la rodea (De la Cuadra, 1992). e intervenir en su competencia intra e interespecífica (Mondo et al, 2013).

TEORÍA

En la producción de semillas de maíz los híbridos de maíz se han desarrollado para obtener plantas con características genéticas mejoradas, alto potencial de rendimiento y combinaciones únicas para combatir enfermedades y condiciones de cultivo. La producción de semillas de maíz híbrido requiere que se cruce, de forma deliberada, una población de progenitores hembra con un progenitor macho, en parcelas aisladas, de esta forma se determina el resultado de la producción desde su inicio. Por lo que cada variedad híbrida consiste en una combinación específica de una progenitora hembra (que produce semilla) y de un progenitor macho (produce polen), y se requiere estar atentos para sembrar en el momento justo, eliminar las plantas atípicas, quitarles las espigas a las hembras antes de que produzcan polen, cosechar por separado la semilla hembra, desgranar y procesar con cuidado la semilla a fin de mantener su calidad. El éxito de este proceso depende de la secuencia en que se realiza, pues cualquier error que se cometa en las primeras etapas del mismo tendrá un efecto significativo en las siguientes, y un error o un problema grave puede llevar al fracaso total o al rechazo del cultivo (DOF, 2007).

Las semillas de híbridos de maíz son esenciales para el aumento del rendimiento de grano y forraje. Por lo que fomentar su uso paulatinamente contribuirá a lograr la Soberanía Alimentaria Nacional. En México existen 1,982 variedades de maíz inscritas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) (SNICS, 2016). Específicamente, en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), se han generado líneas de progenitores de hembras y machos de varios híbridos de maíz. En el caso del Centro de Investigación Regional Pacifico Centro (CIRPAC) del INIFAP, las líneas de maíz liberadas se comercializan en 17 estados de México en regiones con condiciones de trópico y subtrópico. Los híbridos trilineales H-377 y H-391 han sido de los más distribuidos por el INIFAP. El híbrido H-377 es de porte alto, con una altura de mazorca intermedia, es de ciclo intermedio tardío, estigmas con antocianinas ausentes, espiga muy grande, mazorca sana con cobertura de regular a buena, grano blanco-cremoso, semidentado y corona hendida, se adapta a las regiones tropicales y subtropicales en un gradiente de altitud que va de los 900 a los 1850 m. Se sugiere para los sistemas agrícolas de riego, punta de riego y buen temporal, con precipitación pluvial superior a los 750 mm. Es un híbrido trilineal que se formó con la cruza simple B-49 x B-41 y la línea B-50 como progenitores hembra y macho, respectivamente. Este híbrido es tolerante al complejo de manchas de asfalto. Además, la línea B-41 también se emplea como el macho que genera la hembra del híbrido H-391 ((B49 × B-41) × B-51), el cual es un híbrido trilineal de maíz de grano blanco, que se considera una opción tecnológica para que los productores de maíz de las regiones subtropicales de México aumenten la productividad y rentabilidad de su sistema de producción (Ramirez-Diaz et al., 2023). Sin embargo, las líneas parentales B-50 y B-41 presentan problemas de germinación y vigor cuando se obtienen semillas de estas líneas por autofecundación (Ramirez-Diaz et al., 2010).

Se ha demostrado que los microorganismos pueden tener un efecto positivo sobre la germinación, la longitud de la raíz y la biomasa total de las plántulas después de la inoculación de semillas con cepas de levadura por lo que mejora el crecimiento de las plantas y aumenta la productividad de la fotosíntesis (Ignatova et al. 2015). Sin embargo, en este estudio la cepa de interés es la levadura *Clavispora lusitaniae* Y35, la cual fue aislada de la endosfera de raíz de plantas de maíz de la raza elotes cónicos de grano azul, en el estado de Hidalgo (Ramos-Garza et al., 2023); *C. lusitaniae* Y35 tiene potencial de promoción de crecimiento vegetal ya que aumentó el largo de plúmula, peso fresco de plúmula, peso fresco de raíz de plántulas en las plántulas de maíz, frijol y calabaza (Calvillo-Aguilar et al., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

Se evaluó la acción y promoción de crecimiento vegetal de *Clavispora lusitaniae* Y35 en bioensayos con semillas de maíz de las líneas parentales B-51 y B-41, Las semillas utilizadas fueron cosechadas bajo diferentes métodos de polinización: planta a planta (P), autofecundación (A) y fraternal (F), las cuales se trataron con diferentes concentraciones ($1x10^8$, $1x10^9$ y $1x10^{10}$) de suspensión microbiana y realizando el método modificado de la ISTA (Calvillo-Aguilar et al., 2023). El ensayo se llevó a cabo con 25 semillas, con 4 repeticiones. Las semillas se colocaron sobre el papel de germinación, se envolvieron en forma de taco, inoculando los tacos con 15 ml de una suspensión de levaduras al 0.5 del nefelómetro de McFarland, y se incubaron por 7-13 días en una cámara de germinación a 25 °C y en un ciclo de 14 horas de luz/10 horas de oscuridad, con riego de cada dos días con 5 ml de agua destilada estéril. Se estableció un ensayo control sin inocular con 4 repeticiones. Para evaluar el efecto de las cepas durante la germinación de las semillas de maíz hibrido se cuantificó el número de plántulas normales, anormales y semillas no germinadas. Se consideraron como plántulas sanas aquellas que no presentaron daños en la raíz ni en el tallo, mientras que se consideraron anormales aquellas que presentaron defectos como la ausencia de raíz primaria, raíces secundarias débiles o daños en el tallo y la raíz. Las semillas no germinadas fueron aquellas que no germinaron. Además, se midieron los parámetros de longitud de la plúmula de la plántula (PL), longitud de la raíz de la plántula (LR), número de raíces por plántula (NR), peso fresco de la plúmula de la plántula (PFP), peso seco de la plúmula de la plántula (PSP), peso fresco de las raíces de la plántula (PFR) y peso seco de las raíce de las plántulas (PSR). Con los resultados obtenidos de los parámetros evaluados, se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y un análisis de componentes principales (PCA) para determinar el efecto de *Clavispora lusitaniae* Y35 en las semillas de maíz híbrido de las líneas parentales B-51 y B-41.

RESULTADOS

La evaluación de la acción y promoción de crecimiento vegetal de *Clavispora lusitaniae* Y35 en bioensayos con semillas de maíz híbrido de las líneas parentales B-51 y B-41 mostraron diferentes comportamientos en el análisis de componentes principales (PCA), dependiendo de la concentración y de los parámetros evaluados. Se identificó que hubo una variación al inocular *a C. lusitaniae* Y35 ya que la gráfica de PCA (Figura 1) de la concentración $1x10^8$ explica el 62.7% de la variación y el componente 1 el 40.9%, y se observa que influyen las variables LR, NG, NR, PFP. Además, la línea que obtuvo mejores resultados fue B51, las polinizadas por autofecundación y fraternal, cuando se inocularon con la suspensión de *Clavispora lusitaniae* Y35.

Para la concentración $1x10^9$, la gráfica de PCA (Figura 2) indica el 63.8% de la variación de los parámetros evaluados. Obteniéndose en el componente 1 el 46.4 % de la variabilidad, y se observa que influyen las viables LR, NR, NG, PFR, PSR. Así también, la línea B51 presentó los mejores resultados en semillas que fueron inoculadas con suspensión de *C. lusitaniae* Y35 y polinizadas por autofecundación y fraternal.

En el gráfico de PCA para la concentración $1x10^{10}$ (Figura 3), se observa el 62.2% de la variación de los datos. El componente 1 explica el 36.1% de la variación total, y en el influyen las variables NG, PFP y PSR. Observándose mejores resultados en la línea B51, cuando son polinizadas por autofecundación e inoculadas con la suspensión de *C. lusitaniae* Y35.
Los análisis mostraron que las semillas de maíz de las líneas parentales B-51 polinizadas por autofecundación y fraternal obtuvieron mejores resultados en los parámetros evaluados, cuando son tratadas con una suspensión de *Clavispora lusitaniae* Y35.

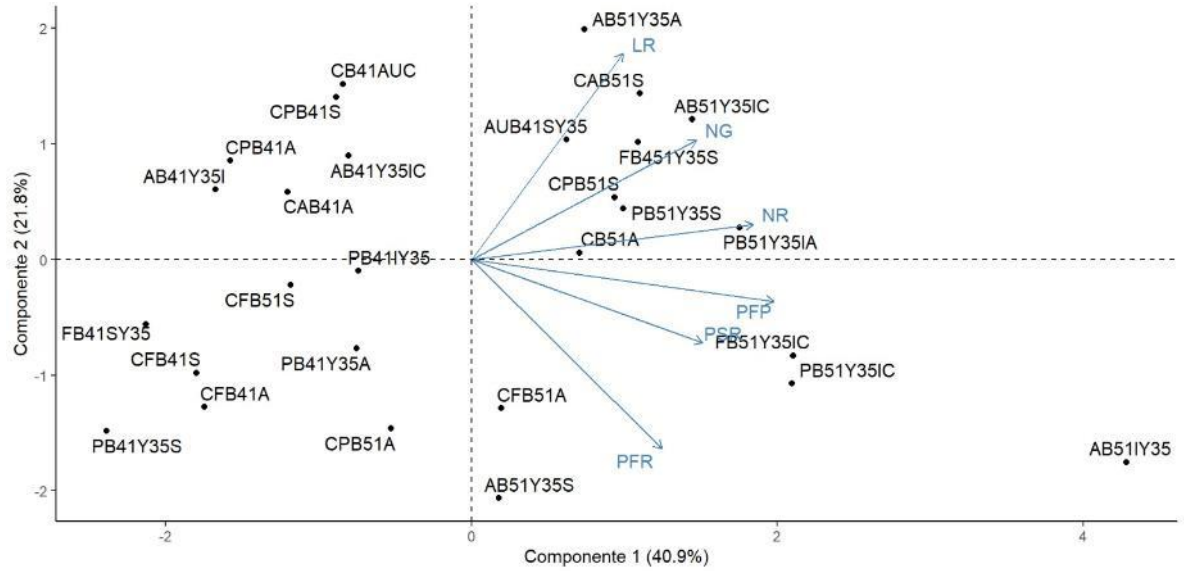


Figura 1. Análisis de Componentes Principales (PCA) de la concentración 1x10^{8} sobre el efecto de *C. lusitaniae* Y35 en los parámetros de germinación y desarrollo de plántulas de maíz de la línea parentales B51 y B41 de INIFAP. Las siglas de las claves corresponden a (C) control, tratamiento inoculado con *C. lusitaniae* (Y35), las polinizaciones de las semillas por autofecundación (A), fraternal (F), planta a planta (P), las semillas (B51) y (B41) y el modo de aplicación del tratamiento como suspensión (S). Se consideraron los parámetros: número de raíces (NR), peso fresco de plúmula (PFP), peso seco de plúmula (PSP), peso fresco de raíces (PFR), peso seco de raíces (PSR) y número de semillas germinadas (NG).

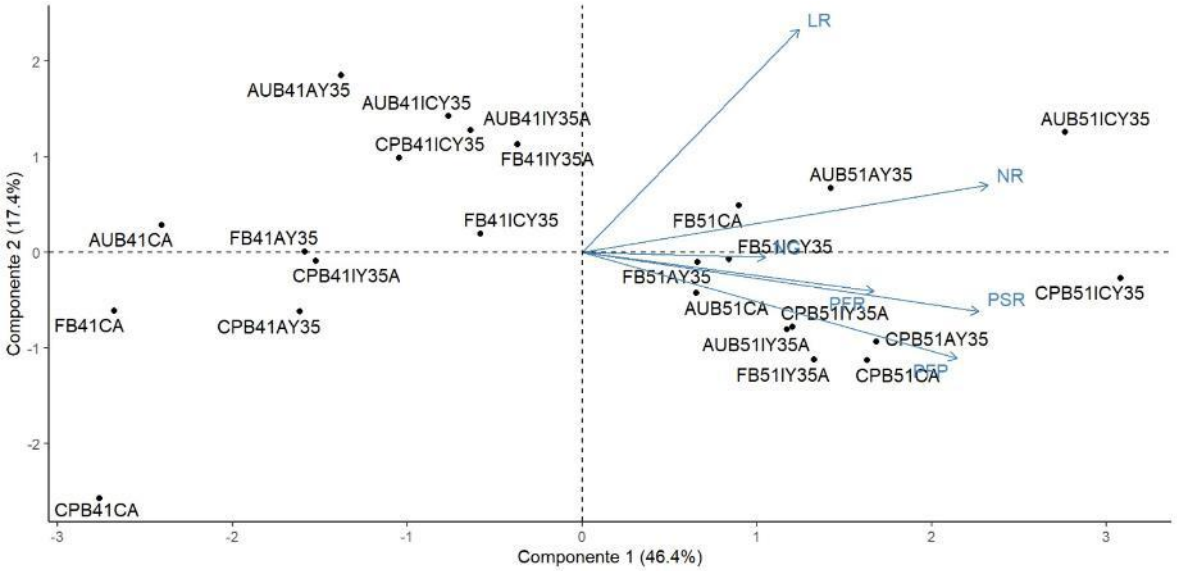


Figura 2. Análisis de Componentes Principales (PCA) de la concentración 1x10^{9} sobre el efecto de C. lusitaniae Y35 en los parámetros de germinación y desarrollo de plántulas de maíz de la línea parentales B51 y B41 de INIFAP. Las siglas de las claves corresponden a (C) control, tratamiento inoculado con C. lusitaniae (Y35), las polinizaciones de las semillas por autofecundación (A), fraternal (F), planta a planta (P), las semillas (B51) y (B41) y el modo de aplicación del tratamiento como suspensión (S). Se consideraron los parámetros: número de raíces (NR), peso fresco de plúmula

(PFP), peso seco de plúmula (PSP), peso fresco de raíces (PFR), peso seco de raíces (PSR) y número de semillas germinadas (NG).

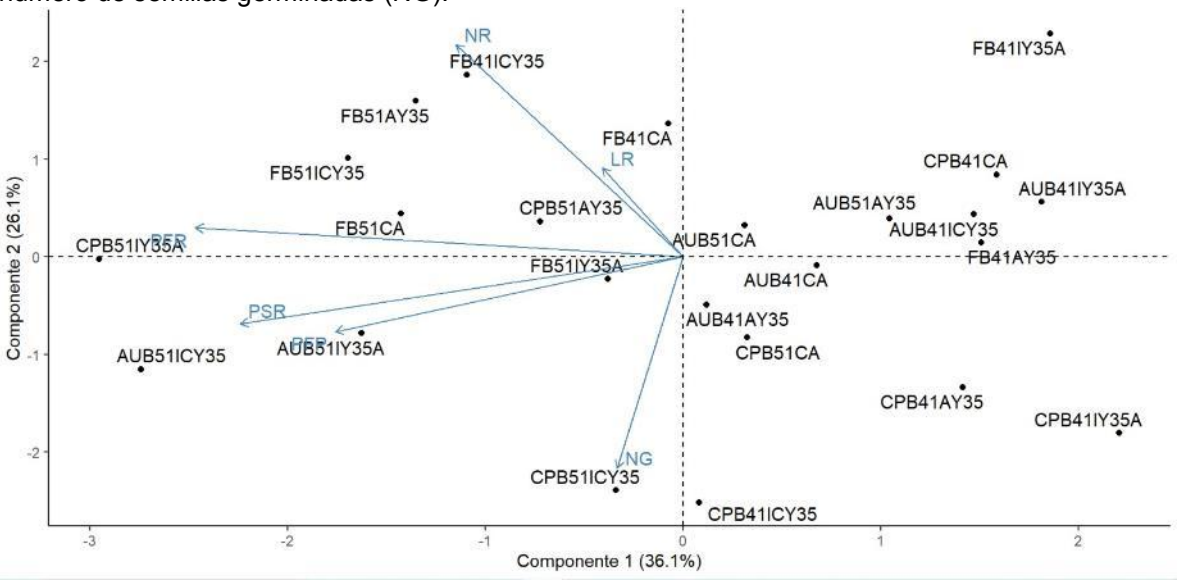


FIGURA 3. Análisis de componentes principales (PCA) de la concentración $1x10^{10}$ sobre el efecto de C. lusitaniae Y35 en los parámetros de germinación y desarrollo de plántulas de maíz de la línea parentales B51 y B41 de INIFAP. las siglas de las claves corresponden a (C) control, tratamiento inoculado con *C. lusitaniae* (Y35), las polinizaciones de las semillas por autofecundación (A), fraternal (F), planta a planta (P), las semillas (B51) y (B41) y el modo de aplicación del tratamiento como suspensión (S). Se consideraron los parámetros: número de raíces (NR), peso fresco de plúmula (PFP), peso seco de plúmula (PSP), peso fresco de raíces (PFR), peso seco de raíces (PSR) y número de semillas germinadas (NG).

CONCLUSIONES

La germinación es el primer paso crítico y determinante del rendimiento de un cultivo. En este proceso los factores como la longevidad de la semilla, la velocidad de germinación, el desarrollo de las plántulas y la tolerancia temprana al estrés, influyen directamente en la duración y el éxito del establecimiento del cultivo. La capacidad de germinación y rápida emergencia de una semilla, especialmente bajo condiciones de estrés, se le conoce como vigor de la semilla, los resultados sugieren que la levadura *Clavispora lusitaniae* Y35 podría potenciar el vigor de las semillas evaluadas, mejorando su desempeño en condiciones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Calvillo-Aguilar F.F., Cruz-Cárdenas C.I., Chávez-Díaz I.F., Sandoval-Cancino G., Ruiz-Ramírez S., Bautista-Ramírez E., Ramos-Garza J., Hernández-Rodríguez C.H., Zelaya-Molina L.X. (2023). Germination test for the evaluation of plant-growth promoting microorganisms. Journal of Microbiological Methods. 207:106708.
2. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2012). El maíz, sus razas y parientes silvestres. Boletín de prensa. CONABIO. 3p.
3. De la Cuadra C. (1992). Germinación, latencia y dormición de las semillas. Hojas divulgadoras. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 24p.
4. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2007). Ley federal de producción, certificación y comercio de semillas. Poder Ejecutivo de la Federación. DOF, México, DF, 1-17.
5. Ignatova L., Brazhnikova Y., Berzhanova R., Mukasheva, T. (2015). Plant growth promoting and antifungal activity of yeasts from dark chestnut soil. Microbiol. Res. 175: 78-83.

6. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2022). Producción y beneficio de semillas de maíz. Obtenido de: https://www.gob.mx/inifap/articulos/produccion-y-beneficio-de-semillas-de-maiz.
7. Mondo V.H.V., Cicero S.M., Dourado-Neto D., Pupim T.L., Dias M.A.N. (2013). Seed vigor and initial growth of corn crop. Journal of Seed Science, 35: 64-69.
8. Ramírez-Díaz J.L., Alemán-de la Torre I., Ledesma-Miramontes A., Vidal-Martínez V.A., Salinas-Moreno Y., Briones-Reyes D., Gómez-Montiel N.A., Peña-Ramos A., Reyes-Méndez C.A. (2023). H-391: híbrido trilineal de maíz de grano blanco para regiones del subtrópico de México. Revista Fitotecnia Mexicana, 46(3): 327-329.
9. Ramírez-Díaz J.L., Chuela-Banorte M., Vidal-Martínez V.A., Vallejo-Delgado H.L., Ramírez-Zamora R., Peña-Ramos A., Ortega-Corona A., Córdova-Orellana H., Morfín-Valencia A., Gómez-Montiel N.O., Caballero-Hernández F., Ramírez-Márquez M., Vázquez-Carillo G., Ruiz-Corral A., Ron-Parra J., Sánchez-González J.J., Soltero-Díaz L. 2010. H-377. Híbrido de maíz de grano blanco para riego y buen temporal para la zona centro-occidente de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Guadalajara. 40pp.
10. Ramos-Garza J., Aguirre-Noyola J.L., Bustamante-Brito R., Zelaya-Molina L.X., Maldonado-Hernández J., Morales-Estrada A.I., Resendiz-Venado Z., Palacios-Olvera J., Angeles-Gallegos T., Terreros-Moysen T., Cortés-Carvajal M. Martínez-Romero E. (2023). Mycobiota of Mexican maize landraces with auxin-producing yeasts that improve plant growth and root development. Plants. 12(6): 1328.
11. Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). Anuario estadístico de la producción agrícola. SIAP. Obtenido de: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.
12. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2023). Catálogo nacional de variedades vegetales. SNICS. Obtenido de: https://lookerstudio.google.com/reporting/5b7206ba-e190-48fe-9696-73523bfccf58/page/itBWB.
13. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2018). ¿Qué es y en qué consiste el análisis de pureza física de las semillas? Obtenido de: https://www.gob.mx/snics/articulos/que-es-y-en-que-consiste-el-analisis-depureza-fisica-de-las-semillas?idiom=es
14. Sierra-Macías M., Rodríguez-Montalvo F.A., Palafox-Caballero A., Espinosa-Calderón A., Andrés-Meza P., Gómez-Montiel N.O., Valdivia-Bernal R. (2016). Productividad de semilla y adopción del híbrido de maíz H-520, en el trópico de México. Agricultura, sociedad y desarrollo. 13(1): 19-32.

ELABORACIÓN DE MICOCOSMETICOS CON HONGOS SILVESTRES, COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA PARA MUJERES EN EL MEDIO RURAL

Lourdes Karen Ramírez Meza [1], Laura Anabel Páez Olivan[2], Néstor Naranjo Jimenez[1], Jaime Herrera Gamboa[3] y Eli Amanda Delgado Alvarado[1]

[1]Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Durango-Instituto Politécnico Nacional, Calle Sigma 119, Fracc. 20 de noviembre II, Durango, Dgo. [2]Tecnologico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, krnramza@outlook.es

RESUMEN

En México los hongos comestibles despiertan interés etnomicológico y económico debido a sus propiedades alimenticias y cualidades medicinales, que los hacen superiores a muchos productos de origen vegetal. Su aprovechamiento en México se realiza por mujeres denominadas hongueras, quienes tienen un amplio conocimiento sobre las formas, colores y demás características de los hongos silvestres comestibles, así mismo se han empoderado el cultivo, por ello se propusieron alternativas para un aprovechamiento integral, es decir darle un valor agregado y ampliar sus opciones de consumo y uso del recurso fúngico. Se realizaron indagaciones sobre algunos productos a base de hongo, algunas de las opciones fueron: la elaboración de mermelada de hongo para consumo directo, para empanadas o para rellenar pan de dulce, así como chorizo y licor de hongo, como productos regionales. se visualizó la posibilidad de elaborar cosméticos como cremas faciales y corporales con hongos cultivados como *Pleurotus* spp y de hongos silvestre del complejo *Amanita caesarea* en la región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, Bajo la premisa “Si no te los comes úntatelos”. Se realizaron colectas de hongos del complejo en la región, fueron preparados para elaborar los extractos y su caracterización de fenoles totales, flavonoides, capacidad antioxidante total, posteriormente se elaboraron las cremas a partir de los extractos y crema base comercial, mediante técnicas basadas con insumos regionales, cuidado que se apegara a la Norma Oficial Mexicana NOM-259-SSA1-2022, Productos y servicios. Buenas prácticas de fabricación en productos cosméticos. Los resultados obtenidos fueron de 6.69 a 16.64 mg EAG/ g ES, mg, flavonoides de 0410 a 0.595 EQ/ g ES, capacidad antioxidante DPPH 478±0.21 µg/mL. Se realizó una encuesta aplicada al azar para un tamaño de muestra de 99, para conocer el interés potencial del uso de esta crema de hongo, los resultados fueron, 79 de las personas encuestadas manifestaron interés de usarla y por ende comprarla, se realizaron pruebas sensoriales indicativas y se determinó que 67% manifestaron que el producto tiene cualidades humectantes, olor, aspecto, textura agradable en un promedio en general de los encuestados del 79%. En suma, el producto puede ser una alternativa para las mujeres de las zonas forestales de la región y de otras zonas de importancia fúngica.

INTRODUCCIÓN

El recurso fúngico del mundo conformado por de 1.5 millones de especies, constituye el reino fungí, la importancia de los hongos en los ecosistemas es sustancial en el reciclaje de nutrientes por degradar la materia orgánica, así mismo por el papel que juega en las tradiciones humanas por sus efectos tóxicos, alucinógenos, alimenticios, medicinales y últimamente de importancia cosmética. los hongos contienen diversos compuestos de interés cosmecéuticos de aplicación tópica y nutricosméticos. de ahí el interés de utilizar hongos del complejo *Amanita caesarea* y del hongo cultivado *Pleurotus* sp en la elaboración de cremas cosméticas, para lo cual se hicieron encuestas para discernir que requiere las personas de una crema y con ello elaborar los micos cosméticos y su valoración sensorial para conocer las bondades del producto. Y con ello darle un valor agregado al comercio de los hongos en el estado de Durango y de otras partes del país, donde las mujeres puedan empoderarse al mejorar su economía, produciendo productos de hongo.

TEORÍA

Hablar de los hongos, es remontarse a los orígenes de la civilización o hasta del hombre mismo. Su presencia ha intrigado a los seres humanos, a tal grado que los ha elevado hasta la divinidad y de igual forma los ha enviado a los infiernos mismos (Naranjo et al, 2012).

El número de especies conocidas es de aproximadamente 69 000, pero en el mundo se estima de manera conservadora en 1,5 millones; seis veces más de lo sugerido hasta ahora (Hawksworth, 1991).

Con respecto a la diversidad de hongos en México, se estima que existen 200,000 especies (Guzmán, 1998). En el país se han descrito al menos 6000 de ellas, 2000 son micromicetos y 4000 son macromicetos, incluyendo líquenes y mixomicetos (Tovar, 2001).

En el territorio mexicano existen bosques templados de gimnospermas y angiospermas, los cuales favorecen el desarrollo de alrededor de 200,000 especies de hongos (Guzmán, 2008). Respecto a los hongos comestibles sólo se consumen aproximadamente 300 especies (Estrada-Martínez *et al.*, 2009).

En las comunidades recolectoras, los hongos suelen ser vendidos de puerta en puerta, pero en localidades más grandes, se comercializan en mercados. (Mariaca *et al.*, 2001; Ruan y Mariaca, 2012).

El nombre de *Amanita caesarea* fue reportado por primera vez en México por Gándara (1929-1931), seguido por Sharp (1948), Singer (1957), Herrera y Guzmán (1972), Guzmán (1973,1977,1978,1984,1997) y Montiel-Arcos (1984). Guzmán (1997) reportó más de 60 nombres comunes para estos hongos, más de 30 en lenguas indígenas (Guzmán y Ramírez ,2001). Guzmán y Ramírez (2001) reportaron que las especies mexicanas del complejo *Amanita caesarea* son seis: *A. basii, A. caesarea, A. laurae, A. tecomante, A. tullossii y A. yema.* Estos hongos que forman el complejo *Amanita caesarea* desde el Este de E.U.A y Canadá hasta México y Guatemala tienen una historia confusa ya que hay varios nombres utilizados para este complejo.

En los bosques de Durango, algunas especies de hongos silvestres comestibles, especialmente los de pudrición blanca y café (lignícolas), pueden ser cultivados. Las especies más prometedoras para el cultivo en el estado son *Sparassis crispa*, *Hericium erinaceus* y *Pleurotus* spp, siendo este último el que mayormente se ha intentado cultivar (Naranjo et al,1995). El interés por el cultivo comercial de hongos comestibles hoy en día se ha extendido a casi todo el país y lo mismo está sucediendo en países de Centro y Sudamérica porque han visto en este cultivo una alternativa alimenticia por su valor nutricional y económico para las comunidades rurales (Martínez-Carrera 2002). A continuación,

se describen los diversos trabajos de investigación realizados sobre el cultivo de la seta Pleurotus spp. en la entidad.

Los componentes principales de la pared celular de los hongos son los polisacáridos (80-90% de la materia seca). La quitina es uno de ellos y es responsable de la rigidez y forma de la pared celular de los grupos taxonómicos Zygo-, Asco-, Basidio- y Deuteromicetos (Vetter 2007. Las especies cultivadas de *Agaricus* tienen más quitina que las especies de pudrición de la madera como L. *edodes, y P. ostreatus* este último con menor cantidad (Vetter 2007).

Los derivados de la quitina y el quitosano, como la carboximetil-quitina y el hidroxipropil-quitasano, por sus propiedades humectantes, estimulan la renovación celular de la piel y el fortalecimiento del cuero cabelludo (Hirano 1995). Estos compuestos son usados en la industria cosmética en la elaboración de cremas humectantes, limpiadoras, pasta de dientes y lociones de baño. Así, diversas sustancias extraídas de macromicetos, se están utilizando en la cosmética, como las ceramidas, el lentinano, el esquizofilano, los ácidos grasos omega 3, 6 y 9, los carotenoides, el resveratrol y otros, Hyde (2010).

Los cosméticos se pueden clasificar en dos categorías: cosmecéuticos de aplicación tópica y nutricosméticos de aplicación oral. Los cosmecéuticos se refieren únicamente a productos de aplicación tópica, como cremas, lociones y ungüentos, mientras que los nutricosméticos, conocidos por sus beneficios percibidos similares, se ingieren por vía oral (la llamada belleza interior). Existen numerosos productos derivados de hongos que se están explotando en cosmecéuticos o nutricosméticos, y muchos productos potenciales aún no se han utilizado Hyde (2010).

Se han realizado numerosos estudios para comprender mejor los diferentes componentes de los hongos que son beneficiosos para la piel. Se ha descubierto que los hongos contienen numerosos metabolitos bioactivos, como lectinas, polisacáridos, fenólicos y polifenólicos, terpenoides, ergosteroles y compuestos orgánicos volátiles (kalac 2013)

Debido a las particularidades antes mencionadas, se procedió a diseñar un cosméticos tipo crema con hongos cultivados y silvestres y su valoración como una opción para impulsar el consumo de hongos en la población micofaga y los micofobos, bajo la premisa “Si no te los comes, úntatelos”, además de una alternativa productiva para mujeres del medio rural.

PARTE EXPERIMENTAL

El presente estudio se realizó en tres etapas:
Primera etapa. -Se elaboró una encuesta digital para conocer las necesidades de cremas cosméticas entre la población mayor de 18 años de la ciudad de Durango, la encuesta se diseñó con 11 preguntas de la cuales fueron 7 cerradas o de opción múltiple, así como 4 abiertas para obtener opiniones de los encuestados, para se estimó el tamaño de muestra mediante:

La muestra de la encuesta se calculó a partir de la siguiente formula de N

$$n = \frac{Z^2\ pqN}{Ne^2+Z^2\ pq} = 99 \text{ ENCUESTAS}$$

Segunda etapa. - Colecta de las especies del complejo *Amanita caesarea,* durante el mes de julio-septiembre del 2024 en diversos sitios del municipio de Pueblo Nuevo, particularmente en el ejido Los Bancos, Buenos Aires, Los Coyotes, La Campana, Cebollas donde se realizaron las colectas, siguiendo la técnica descrita por Zamora-Martinez, 1994; Gómez *et al.,* 1999. Se localizaron las fructificaciones, mediante recorridos por el bosque, donde se buscaron montículos de hojarasca en el piso forestal. La búsqueda se realizó alrededor de los árboles, una vez ubicado el hongo, se

removió la hojarasca con movimientos suaves de la mano con la finalidad de maltratar lo menos posible el cuerpo fructífero; una vez descubierto, se recolectaron los individuos maduros. Se cubrió con hojarasca el espacio que quedó al extraer el hongo, para que el micelio no se deshidratara. Se golpeó levemente el cuerpo fructífero para liberar las esporas antes de cubrir el hueco. El muestreo fue dirigido hacia las principales especies del complejo *A. caesarea*, colectando como máximo 500 g de cada especie.

Se elaboraron los extractos de hongo y se caracterizaron mediante la determinación de fenoles totales, la técnica utilizada fue la de Singleton y Rossi, 1965, con algunas modificaciones, También se determinó flavonoides totales y actividad antioxidante mediante DPPH.

Se realizaron acciones de acercamiento con mujeres de la comunidad de san Antonio y anexos del municipio de pueblo nuevo, durango. Se les capacito en el cultivo del hongo *Pleurotus* sp, así mismo en la elaboración de producto con el hongo, entre dichos productos fueron las cremas cosméticas, mediante la siguiente metodología:

La crema fue elaborada con crema base comercial existente en el mercado de materias primas y se le agrego extracto acuoso del hongo *Pleurotus* sp, y/o del complejo *Amanita caesarea* en una proporción de 100 ml de extracto de hongo /1000 g de crema base comercial, se cuidó las formas de acuerdo con las condiciones del lugar y de la Norma Oficial Mexicana NOM-259-SSA1-2022, Productos y servicios. Buenas prácticas de fabricación en productos cosméticos. Se diseñó la encuesta y se aplicó a 50 usuarias al azar

RESULTADOS

Los datos obtenidos al ser analizados mostraron que 90% de los encuestados manifestaron el uso de cremas cosméticas, de estas el 25% que fueran humectantes, 21% suavizantes, 28 aclarante o eliminar manchasen la piel y el resto 26% con efectos anti edad.

Bajo esta premisa se elaboraron las cremas, se caracterizaros los extractos de los hongos Los resultados obtenidos fueron de 6.69 a 16.64 mg EAG/ g ES, mg, flavonoides de 0410 a 0.595 EQ/ g ES, capacidad antioxidante DPPH 478±0.21 µg/mL. Posteriormente se realizaron las pruebas sensoriales y el 40% manifestaron que les suavizó la piel, 30% se las aclaró, 10% eliminó manchas, 4% manifestó un efecto sobre las arrugas y 6% dijo que el producto no presentó ninguna mejora para ellas. El 80% indicó que de existir el producto en el mercado lo compraría y lo recomendaría. Solo 5% de los encuestados mencionaron algún efecto negativo sobre la piel (ligero escozor). En términos prácticos la crema representa una alternativa más para diversificar los usos de los hongos.

Se realizó una segunda encuesta aplicada al azar para un tamaño de muestra de 99, los resultados fueron, 79 de las personas encuestadas manifestaron interés de usarla y por ende comprarla, se realizaron pruebas sensoriales indicativas y se determinó que 67% manifestaron que el producto tiene cualidades humectantes, olor, aspecto, textura agradable en un promedio en general de los encuestados del 79%.

CONCLUSIONES

El cultivo de hongos comestibles es una posibilidad para paliar la pobreza en comunidades deprimidas o marginadas. Primeramente, al producir un alimento para autoconsumo, aunque la comercialización posterior permite obtener ingresos adicionales, que pueden ser mejorados con la elaboración de productos con mayor valor agregado y más vida de anaquel

BIBLIOGRAFÍA

1. D.L. Hawksworth. The fungal dimension of biodiversity: magnitude, significance, and conservation. Mycological Research Volume 95, Issue 6, 1991, pp 641-655

2. D. Martínez-Carrera, D. Current development of mushroom biotechnology in Latin-American. World Society for Mushroom Biology and Mushroom Products Symposium: Prospects of Mushroom Cultivation in Latin America for the XXI Century. Micología Aplicada Internacional 14, 2002, pp 61-74

3. E. Estrada-Martínez, G. Guzmán, G., D. Cibrián y R. Ortega Paczka, R. (2009). Contribución al conocimiento etnomicológico de los hongos comestibles silvestres de mercados regionales y comunidades de la Sierra Nevada (México). Interciencia*, 34*,2009, pp 025-033.

4. G. Guzmán, G.1998. La Diversidad Biológica en Iberoamérica. Acta Zoológica Mexicana, Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México, pp 337

5. G. Guzmán, G. F. Ramírez. *The Amanita caesarea-complex. Berlin. Stutgart Band 187, 2001, pp 1-9*

6. J. N. Naranjo, C.J. Herrera, N. Almaraz y J. N. Uribe. Elaboración de productos con hongos. *Hongos comestibles y medicinales en Iberoamérica* (ed. 1° El Colegio de la Frontera Sur, Mexico, 2012) pp 349-360.

7. K.D. Hyde, A.H. Bahkali, M.A. Moslem. (2010) Fungi — An unusual source for cosmetics. Fungal Divers., *43*, 2010, pp 1–9.

8. N. Naranjo-Jiménez, N., R. J. A. Ávila., L. M. E. Pérez Cultivo de hongos comestibles. Parte I. Ubamari 34, 1995, pp 51-57

9. P. A. Kalaˇc, Review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms. J. Sci. Food Agric., 93, 2013, pp 209–218

10. R. Mariaca, L. Silva-Pérez y C.A. Castaños-Montes. Proceso de recolección y comercialización de hongos comestibles silvestres en el Valle de Toluca, México. CIENCIA*, 8*, 2001, pp30-40.

11. S. Hirano. Chitin biotechnology application. Biotechnol. Ann. Rev. 2, 1995, pp 237-258

12. V. J. A. Tovar. 2001. Qué tan diversos son los hongos. Memorias del IV Congreso Mexicano de Etnobiología. Asociación Etnobiológica Mexicana (AEM). México.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN INVERNADERO EN LA PRODUCCIÓN DE HONGOS

Susana Lezama Alvarez, María Teresa Torres-Mancera, Nancy Elizabeth Velázquez Salinas, Rogel Fernando Retes-Mantilla

Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
teresa@tesco.edu.mx

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica para la automatización de invernaderos dedicados a la producción de hongos en el Estado de México representa una estrategia innovadora y sostenible que combina eficiencia energética con agricultura avanzada. Esta integración no solo optimiza los recursos disponibles, sino que también promueve prácticas agrícolas más ecológicas y rentables. México se destaca por su elevado potencial en energía solar debido a su ubicación geográfica privilegiada. Aproximadamente el 70% del territorio nacional recibe una irradiación superior a 4.5 kWh/m²/día, posicionando al país como un lugar idóneo para la generación de energía fotovoltaica. Los invernaderos fotovoltaicos, también conocidos como agrovoltaicos, son estructuras que integran paneles solares en su diseño para generar energía eléctrica mientras se cultivan productos agrícolas en su interior. Esta dualidad permite un uso eficiente del espacio y de los recursos naturales. Los paneles solares instalados en los techos o estructuras de los invernaderos capturan la luz solar para producir electricidad, la cual puede ser utilizada para alimentar sistemas de automatización, control climático, riego y otros equipos esenciales para el cultivo de hongos La producción de hongos requiere condiciones ambientales controladas, incluyendo temperatura, humedad y circulación de aire específicas. La automatización de invernaderos permite monitorear y ajustar estos parámetros de manera precisa y en tiempo real, asegurando un entorno óptimo para el crecimiento de los hongos. La energía generada por los paneles solares puede abastecer sistemas de sensores, actuadores, ventilación y climatización, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y disminuyendo los costos operativos. La temperatura es un factor importante en la instalación de los paneles solares por lo que la temperatura promedio anual en el Estado México calculada fue de 21.6ºC. En relación al estudio de las tecnologías se tienen cinco que son silicio cristalino, silicio amorfo, telurio de cadmio, CIGS, HIT. El silicio poli cristalino es de las tecnologías que más se fabrica y vende aportando al mercado el 57%. El promedio de insolación diaria se calculó en 5.1 horas, siendo los meses de abril y mayo donde se tiene la mayor cantidad de horas de radiación. El ángulo de inclinación para los módulos se calculó en 18.75º. El panel solar que se utilizó es el fabricado en México por la empresa SAYA por lo que a partir de sus características se calcularon 4 módulos. Estos parámetros fueron calculados de acuerdo la instalación a automatizar para la producción de hongos.

INTRODUCCIÓN

Recursos fúngicos

El cultivo de hongos comestibles ha adquirido una relevancia creciente en el ámbito agroalimentario debido a su alto valor nutricional, bajo impacto ambiental y potencial económico para pequeños y medianos productores (Royse et al., 2017). Este tipo de producción se caracteriza por requerir condiciones ambientales específicas y controladas, tales como temperatura, humedad, ventilación e iluminación, lo que convierte a los invernaderos en entornos ideales para su desarrollo. Sin embargo, mantener estas condiciones de manera constante implica un consumo energético considerable, lo que representa un desafío tanto económico como ecológico.

En este contexto, la incorporación de energías renovables, en particular la energía solar fotovoltaica, ofrece una alternativa sostenible y eficiente para alimentar los sistemas de automatización requeridos en los invernaderos. La automatización, a su vez, permite optimizar el control de

parámetros críticos del microclima, mejorando la productividad y reduciendo la intervención humana (Camarena-Ibarrola et al., 2021). De esta manera, se crea una sinergia entre sostenibilidad energética y eficiencia en la producción, especialmente valiosa en regiones con recursos limitados o donde el acceso a la red eléctrica es restringido.

El presente capítulo aborda el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica para la automatización de un invernadero destinado a la producción de hongos, con un enfoque práctico e interdisciplinario que integra conocimientos de ingeniería, agricultura sustentable y tecnologías emergentes.

Energía fotovoltaica en México

De 1993 a 2003, la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos en México se incrementó de 7 a 15 MW, generando más de 8,000 mWh/año para electricidad rural, bombeo de agua y refrigeración (CONAE, 2007).

Entre los proyectos y plantas relacionados con la energía solar fotovoltaica en México se tiene el proyecto *Aura Solar*, situado en La Paz (Baja California Sur), inaugurado a principios de 2014, tenía previsto generar 82 GWh al año, suficiente para abastecer el consumo de 164,000 habitantes (65 % de la población de La Paz), pero fue arrasado por el huracán Odile en septiembre del mismo año y la planta no opera desde entonces. La instalación cubría una superficie de 100 hectáreas con 131,800 módulos policristalinos sobre seguidores de un eje (Flores, 2016; Martínez, 2013).

Otra planta fotovoltaica de 47 MW se encuentra en fase de planificación en Puerto Libertad (Sonora). La planta, originalmente diseñada para albergar 39 MW, se amplió para permitir la generación de 107 GWh/año (Electric Ligth and Power, 2012; Sonora Energy Group, 2012).

En 2015 se instaló entre 39 y 48 megawatts en parques solares, entre 18 y 20 megawatts en instalaciones comerciales de mediana escala, entre 28 y 30 megawatts en instalaciones residenciales, 3 megawatts en electrificación rural y bombeo agua, 1 megawatt en luminarias solares.

Desde la publicación del Primer Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar en Pequeña Escala, así como la entrada en operación de la primera central fotovoltaica de gran escala en 2011, la capacidad instalada y la generación de energía eléctrica a partir de energía solar se incrementó de 18.5 MW y 8.8 GWh en el año 2007 a 170.24 MW y 190.26 GWh en el año 2015. Este incremento se ha visto reforzado por el crecimiento importante de los Contratos de Interconexión Legados (Pequeña y Mediana Escala), los cuales desde 2010 han observado tasas de crecimiento importantes (Prospectivas de Energías Renovables 2016-2030, Figura 1).

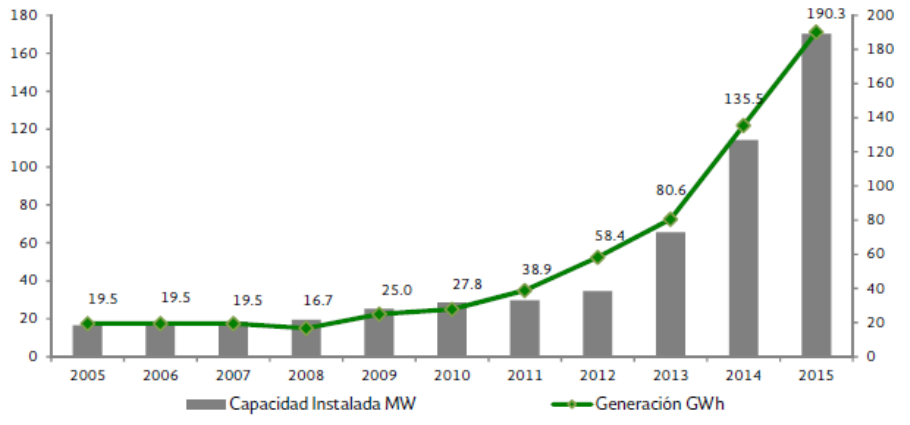


Figura 1. Capacidad efectiva instalada y generación bruta de centrales solares fotovoltaicas 2005-2015

En México, al 2015 se reportaron 9 centrales de generación con energía solar fotovoltaica, éstas se encuentran distribuidas en distintas áreas operativas: dos en Baja California, una en Baja California Sur, una en Noroeste, una en el área Norte, dos en el área Occidental, una en el área central y la última en Mulegé. En conjunto, suman 56.0 MW de capacidad y generaron 78.0 GWh de energía eléctrica.

El gran potencial de la energía solar se vio reflejado en los resultados de la segunda subasta eléctrica al ganar el 54% del total requerido (4,836, 597.0 MWh), cabe recordar que la energía limpia adquirida en esta subasta equivale a aproximadamente el 3% de la generación anual de electricidad en México. Se espera que al cierre de 2019 se adicionen 5,400 MW de capacidad (20 veces la capacidad actual), debido a las adiciones de capacidad de nuevas centrales, y a los proyectos ganadores de la primera y segunda subasta que contribuirán con 1,691 MW y 1,853 MW respectivamente.

Para 2015, la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica fue de 190.3 MW y se espera un incremento de 6,834.8 MW en nuevos proyectos. De los proyectos considerados, 56.3% se encuentran en fase de construcción o por iniciar obras; 24.8% son proyectos por licitar o adjudicados en la primera subasta eléctrica de largo plazo y 18.9% para los restantes.

La energía solar fotovoltaica está comenzando a jugar un rol importante en la generación de electricidad en algunos países. Esto se debe a que la rápida disminución en los costos ha hecho que la electricidad no subsidiada y generada a partir de energía solar fotovoltaica, pueda competir con los costos de los combustibles fósiles.

Para el caso de México se tiene previsto un incremento de capacidad instalada de 568.2%, pasando de 1,031.2 MW en 2016 a 6,890.9 MW en 2030. Cabe destacar que habrá dos períodos trascendentes para la adición de capacidad de generación eléctrica, el primero será entre 2016 y 2018, con cerca de 3,546.6 MW. El segundo período comprende del 2020 al 2030, siendo 2025, 2026 y 2027, los que tendrán la mayor adición de capacidad a instalar con 3,288.1 MW.

Respecto a la generación de energía eléctrica, esta se incrementará 2,180.7 % (equivalente a 12,140.4 GWh), y ubicarse así en 12,697.1 GWh al final del período de proyección.

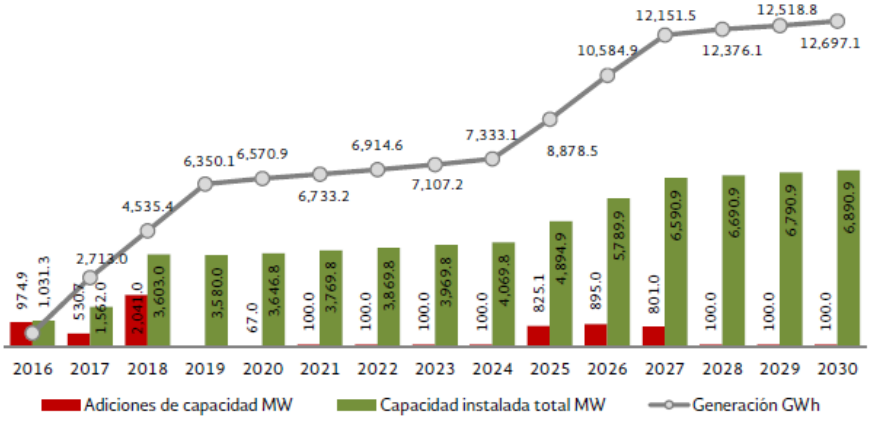


Figura 2. Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología solar fotovoltaica 2016-2030

Energía solar fotovoltaica

La energía fotovoltaica se produce a partir de celdas fotovoltaicas que son placas fabricadas principalmente de silicio. Este tipo de celdas para proveer de energía eléctrica durante la noche requieren de baterías donde se almacena la energía eléctrica generada durante el día. Los sistemas

fotovoltaicos pueden ser conectados directamente a la red eléctrica, evitando así el uso de baterías (CONAE, 2007).

El efecto fotovoltaico de las celdas solares se basa en que la luz incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del fotovoltaje o del potencial entre las capas (Estrada y Arancibia, 2011). La luz al incidir sobre un semiconductor la energía suministrada ayuda a darle mayor movilidad a algunos de los electrones presentes en el material, por lo que su capacidad para conducir la electricidad aumenta. Sin embargo, para producir el efecto fotovoltaico no basta con liberar electrones. Es necesario que aparezca un voltaje que mueva a estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica. La forma más común de lograr esto es unir dos materiales semiconductores de características electrónicas diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (se le llama material tipo N), mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (material tipo P). El efecto fotovoltaico se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales.

Dado que la potencia que genera una celda solar es pequeña, lo que se hace es conectar varias entre sí para aumentar el voltaje o la corriente. Generalmente se fabrican para producir voltajes de 12 o 24 volts de corriente directa. A un conjunto de varias celdas conectadas entre sí se le llama panel o módulo fotovoltaico (Arancibia y Best y Brown, 2010). Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil. (Estrada y Arancibia, 2011). Usando módulos solares respaldados con baterías es posible dar energía a una gran variedad de aplicaciones aisladas, como telefonía rural, antenas de telecomunicaciones, boyas marítimas, televisión educativa rural, estaciones meteorológicas remotas, bombeo de agua rural, señalizaciones en carreteras y otras. En los primeros años de la tecnología fotovoltaica estas aplicaciones fueron las que más crecieron. Sin embargo, hoy las aplicaciones que más están creciendo son las de suministro de electricidad a casas o edificios de oficinas ubicados en ciudades (Arancibia y Best y Brown, 2010).

Radiación solar en México

La República Mexicana cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 2,000,000 km^2 y se encuentra ubicada en el hemisferio norte dentro de una franja latitudinal que va desde los 14° a los 33°. Los lugares de mayor irradiación solar global se presentan en los estados del norte como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Durango, centro de San Luis Potosí, la llanura costera de Sinaloa, Sonora y la península de Baja California con valores promedio diario mensual estimados entre los 25 - 29 MJ/m^2 durante los meses de abril a junio.

En invierno los estados de menor incidencia de irradiación solar global son Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche con valores entre los 11 a 13 MJ/m^2, debido a los fenómenos meteorológicos que se presentan en dicha estación del año. El valor promedio diario anual en la República Mexicana se estima del orden de los 20 MJ/m^2.

En 1975 el Instituto de Ingeniería de la UNAM, generó la primera versión de los mapas de irradiación global promedio diaria mensual para México, utilizando datos de irradiación de 54 estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). El modelo aplicado tiene desviaciones menores del 10 por ciento y fue desarrollado en la India, situación que hizo más confiable su aplicación en México, ya que tanto la latitud, como los climas en ambos países son semejantes.

En México se han publicado varios trabajos sobre radiación solar, enfocándose a mapas y tablas elaborados por diferentes instituciones a través de modelos matemáticos. Algunos de ellos utilizan datos medidos por satélites que incluyen aspectos de nubosidad o radiación reflejada al espacio. Otros utilizan variables meteorológicas medidas en tierra, como humedad, precipitación, etc. La información vertida en dichos mapas ha ido cambiando con el transcurso del tiempo, derivado de los cambios climáticos que se presentan año tras año, por lo cual se recomienda cuando se use dicha información considerar la más actualizada (Islas et al., 2015).

Invernaderos

La agricultura protegida es aquella que emplea diversas técnicas y estructuras con el propósito de evitar o reducir al mínimo las restricciones que el clima impone a los cultivos, proporcionando un ambiente más propicio para el desarrollo de las plantas. Las técnicas y estructuras empleadas para proteger los cultivos se dirigen contra los efectos del viento, las bajas o altas temperaturas, las heladas, el granizo, el exceso de radiación luminosa y la evaporación, al mismo tiempo que se puede procurar la protección del suelo y el uso eficiente del agua.

Un invernadero es una construcción agrícola con estructura de madera o metal, usada para la protección de cultivos, mediante su aislamiento del exterior con una cubierta plástica translúcida o vidrio y mallas en las partes laterales (PESA, 2007).

Los invernaderos se han convertido en una necesidad debido a una importante serie de factores que afectan la producción agrícola a campo abierto, como son bajas temperaturas y la incidencia de plagas y enfermedades.

La utilización de invernaderos para la producción de hortalizas combinado con la hidroponía y el fertirriego ha permitido a los productores incrementar la producción por unidad de superficie y la calidad de los productos, así como mantener producción constante a lo largo del año (Mondragón, 2005)

Los invernaderos funcionan bajo dos principios fundamentales:
1) La transformación de la energía luminosa en energía calorífica
2) La circulación del aire con el movimiento ascendente del aire caliente y descendente del aire frío. Además del efecto invernadero que consiste en captar la energía radiante, se producen otros efectos como el sombreo, el efecto paraguas, cortavientos y efecto oasis, al poderse mantener un ambiente más húmedo que en el exterior de zonas áridas.

En este sentido en la producción de algunas verduras y frutas la concentración de CO_2 presentan un papel importante en la maduración, sabor y color.

Los principales factores que se pretende controlar con el manejo del invernadero son la temperatura, la luminosidad, la humedad ambiental y la concentración de CO_2. Estos factores son interdependientes entre sí, por lo que cuando se modifica uno de ellos los otros resultan afectados. Los factores como el tipo de cultivo, el sistema de manejo, la fertilización, el riego, dependen más de la decisión de los productores.

La cantidad de luz que entra al invernadero está determinada por la duración del día, la nubosidad y la forma del invernadero. La posición y orientación también influyen pues se deben evitar los sitios que tienen sombra. Hay que tomar en cuenta que a mayor latitud existe menor cantidad de horas luz en el año y que los rayos de ésta llegan con mayor inclinación. En términos generales existe mayor radiación luminosa en los estados del sur que en los del norte. Además, todos los materiales plásticos usados como cubierta reflejan una fracción de la luz de entre el 20 y el 30%.

Los techos de forma cilíndrica o parabólica captan mejor la luz que los de tipo capilla y mientras más alta sea la estructura mejor es la captación de luz. Además, para tener una mayor luminosidad conviene hacer estructuras con postes delgados y con el menor número posible de ellos, para que no proyecten sombra.

La temperatura interna varía en forma directa con la cantidad de horas de energía radiante y de manera inversa con la altura del invernadero. Por lo anterior mientras más luz capte el invernadero mayor es la temperatura, pero mientras más alto sea el invernadero menor será la temperatura que alcance por el volumen de aire que se tiene que calentar. Siendo así, invernaderos altos de 4 a 5 m

de altura en cumbrera, son convenientes en las regiones cálidas, mientras que los invernaderos de 3.5 a 4 metros de altura, pueden dar mejores resultados en las regiones templadas o frías.

La regulación de la temperatura y la humedad en el interior del invernadero se logra a través de la ventilación. La abertura cenital sirve para expulsar aire caliente del interior hacia fuera, en tanto que las ventilas laterales permiten la entrada de aire fresco. La circulación del aire también permite la renovación del CO_2 necesario para la fotosíntesis, el cual puede bajar drásticamente su concentración en invernaderos cerrados con cultivos densos y altos.

La mayoría de los expertos en el diseño de invernaderos indican que se requiere de 15 a 30% de ventila lateral por metro cuadrado de superficie cubierta. En el caso de la abertura cenital esta relación baja hasta el 6%. Sin embargo, cuando se colocan mallas anti-áfidas la ventilación se reduce hasta un 80%. Si es pequeña la abertura cenital, es mayor la cantidad de aire caliente que pasa en un minuto y también influye el movimiento de aire que existe en el exterior.

De acuerdo con las exigencias climáticas de cada especie se pueden perfeccionar las características de las construcciones e integrar los sistemas de climatización más convenientes, como los calentadores de gas. El tamaño, forma, orientación, materiales de estructuras y cubiertas, así como el equipamiento del invernadero, son factores que dependen de los requerimientos ambientales de la especie a cultivar, las condiciones ambientales prevalecientes en el exterior, el grado de control que se pretenda lograr sobre el microclima del cultivo y las posibilidades económicas del productor, así como de la rentabilidad potencial de la especie a cultivar (PESA, 2007).

En este sentido los invernaderos pueden ser automatizados lo cual mejoraría la producción de los vegetales y/o frutas, al poder controlar el sistema de ventilación, humedad, temperatura y riego.

RESULTADOS

Invernadero metálico

Se tomaron las medidas y modelos de construcción del Programa Especial para la Seguridad alimentaria PESA-México 2007. Para la implementación y operación del invernadero metálico, se propuso la construcción de un invernadero tipo túnel bati-cenital, con techo semicilíndrico y ventila cenital. La estructura se fabrica con perfil PTR galvanizado calibre 14 de 2 pulg cubriendo una superficie de 7 m de ancho por 30 m de largo, 210 m en total. Los postes de 2 pulg × 5 m de altura son colocados a cada 5 m en las laterales. La cubierta a base de polietileno térmico tratado con UV-2, es sujetada con perfil polygrap. Con ventila cenital y paredes laterales con malla anti-áfidos 40 × 25.

En el interior del invernadero se tendrían 4 camas de cultivo, con medidas de 28.5 m × 1.20 m, con 40 cm de pasillo entre camas, para cultivar un total de 1,140 plantas. También se le instalará un sistema de riego por goteo con goteros a cada 30 cm, con un gasto de 1 litro por hora, la cinta que se ocupará es del calibre 8,000. La fertilización es de tipo orgánico con la aplicación de composta.
En este invernadero el sistema de bombeo de riego, la medición de temperatura, humedad y gas CO_2 y ventilación se realizará a través de un sistema modificado de respirometría Título de patente No. 336733

Sistema Fotovoltaico

A continuación, se muestran los parámetros ambientales y elementos necesarios para el diseño del sistema solar fotovoltaico.

Temperatura del Estado de México

La temperatura es un factor importante en la instalación de los paneles solares por este motivo se obtuvieron las temperaturas máximas del Estado de México en el año 2016 a partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional, teniendo una temperatura anual promedio de 21.6°C.

Tabla 2. Temperatura máxima en el Estado de México en el año 2024 (SMN)											
Temperatura en °C											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
15.7	18.3	23.1	24.5	26.3	25.1	20.9	21.4	20.7	21.6	20.9	20.9

Estimación del recurso solar del Estado de México

La SENER estimó el recurso solar por estado de la República Mexicana a partir de la base de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), la cual incluye datos analizados de más de diez años. Los datos se obtuvieron considerando los límites de cada estado a través de sus coordenadas geográficas sobre la superficie terrestre dadas por la latitud y longitud, valores que se determinaron usando la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

En la Figura 3 Se puede observar que la temperatura máxima promedio anual del Estado de México está en el rango de 1 a 25 °C, estimada para el año 2016 como lo presenta el apartado anterior en 21.6°C.

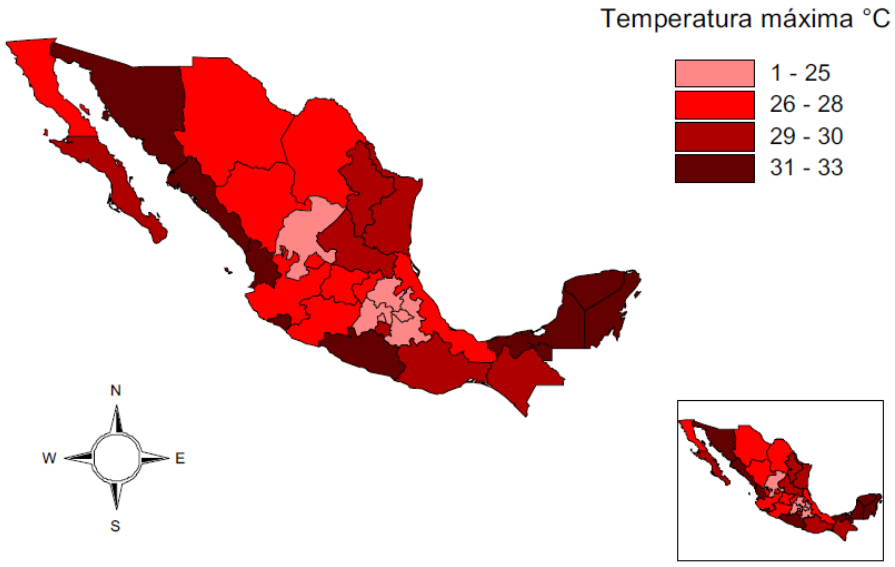


Figura 3. Temperatura máxima promedio anual de la República Mexicana.

Con base en los límites geográficos para cada estado, se identificaron las diferencias de altitud y climatología con el objeto de determinar una metodología aritmética para la obtención de valores promedio de irradiación solar. Se introdujeron coordenadas geográficas de los límites de cada estado y con la base de datos de la NASA se generaron los valores de irradiación. La base de datos de la NASA permite tener una información de por lo menos diez años de valores de irradiación solar, temperatura ambiente, velocidad de viento y otros parámetros ambientales, en caso de ser requeridos, mes por mes o bien anualizados. El recurso solar mostrado en los mapas corresponde a la irradiación sobre una superficie horizontal. En aplicaciones fotovoltaicas es conveniente el trabajar con unidades de Wh en lugar de joules que es la unidad de energía en el sistema internacional de unidades.

Para cada estado se identificó el valor mínimo y el valor máximo del recurso solar y dichos valores se consideraron para elaborar el mapa que proporciona el recurso solar de México. La Figura 4 muestra el mapa del recurso solar expresado en kWh/m^2 considerando valores promedios diarios

anuales. Es importante tener en consideración que este mapa se recomienda usarlo exclusivamente para estimaciones preliminares energéticas. Sin embargo, para estimaciones más precisas se debe de usar la base de datos generada para cada municipio y/o ciudad importante en los estados. El recurso solar promedio anual del Estado de México va en un rango de 5.32 a 5.57 kWh/m^2.

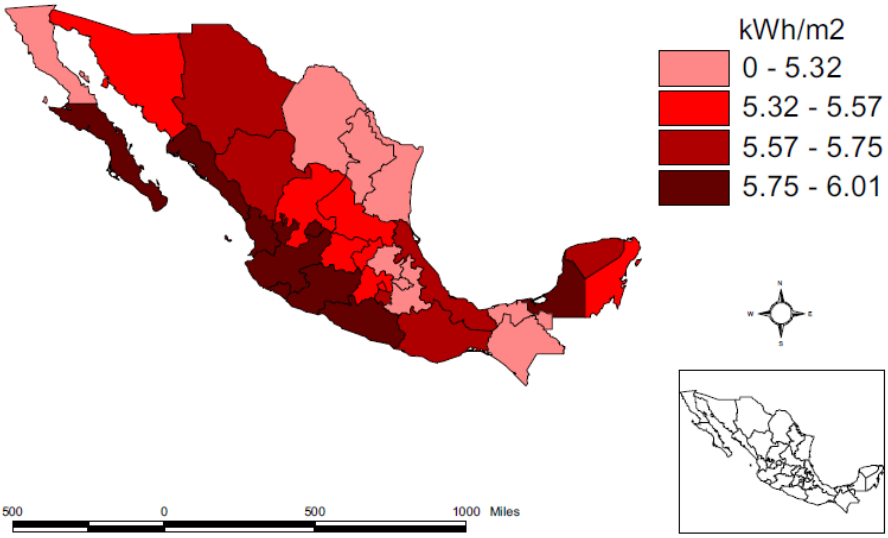


Figura 4. Recurso solar promedio anual de la República Mexicana.

Con base en los datos proporcionados por los fabricantes de las tecnologías fotovoltaicas de silicio monocristalino, silicio policristalino, silicio amorfo, telurio de cadmio y cobre indio galio selenio respecto del coeficiente de perdida en la potencia derivado de la temperatura, y usando la temperatura ambiente máxima, se ha determinado el rendimiento térmico del módulo fotovoltaico correspondiente. En la Tabla 3 se presentan los valores de irradiancia y el rendimiento de las diferentes tecnologías para el Estado de México.

Tabla 3. Valores de irradiación y el rendimiento de las diferentes tecnologías del Estado de México

Recurso solar Promedio Anual (kWh/m^2)			Rendimiento de Tecnología Fotovoltaica (%)					
4.44	**6.74**	**5.57**	**88.98**	**90.56**	**94.82**	**89.14**	**94.60**	**89.51**

Análisis de las tecnologías fotovoltaicas

Hay cinco tecnologías fotovoltaicas que se comercializan a nivel Mundial que son silicio cristalino (monocristal y policristal), silicio amorfo (celda sencilla, doble celda y triple celda), telurio de cadmio, CIGS (Cobre Indio Galio Selenio), HIT (Heterounión con capa intrínseca).

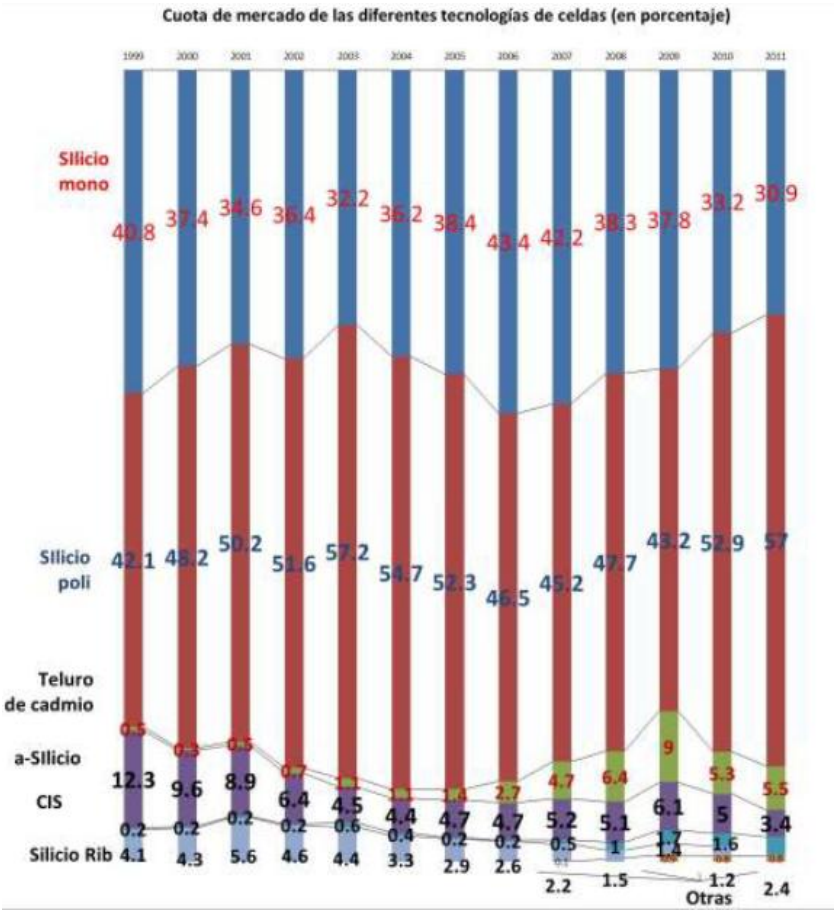


Figura 5. Aportación de tecnologías en el mercado internacional

La Figura 5 muestra la aportación de cada una de las tecnologías al mercado internacional. En ella se puede observar que la tecnología que más se fabrica y se vende es la de silicio policristalino con 57%, seguido por la tecnología monocristalina con el 30.9%. La tecnología fotovoltaica que se comercializa en México se importa de muchas regiones del mundo, entre las que destacan, Asia (China, Taiwán, Corea, Japón), América del norte (E.U.A., Canadá), Europa (Alemania, España, Italia), y prácticamente el perfil de tecnología comercializada es el mismo que a nivel mundial. Según datos proporcionados por la Asociación Nacional de la Energía Solar y la SENER se ha estimado a la fecha una capacidad fotovoltaica de 32 MW.

Hora solar pico

Es la unidad de medición de la irradiación solar. La siguiente Tabla 4 muestra la irradiación solar en kWh/m^2•día en cada uno de los meses el Estado de México. Se observa que la mínima es de 3.9 kWh/m^2•día, la máxima es de 5.9 kWh/m^2•día, por lo que promedio anual es de 5.1 kWh/m^2•día.

Tabla 4. Irradiación solar del Estado de México (kWh/m^2)											
Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
4.5	**5.1**	**5.6**	**5.8**	**5.9**	**5.4**	**5.2**	**5.2**	**5.0**	**4.7**	**4.6**	**3.9**

Dia solar promedio

En el caso de este proyecto el promedio de insolación diaria en el Estado de México es de 5.1 kWh/m^2. Si este valor es dividido por un SOL, se obtiene el valor, en horas, del día solar promedio para el Estado de México

$$DIA\ SOLAR = \frac{\frac{5.1 kWh}{m^2}}{\frac{1 kW}{m^2}} = 5.1\ horas$$

Horas de radiación en el Estado de México

A partir de la irradiación solar del Estado de México podemos calcular las horas pico mensual en donde observamos el siguiente perfil (Figura 6).

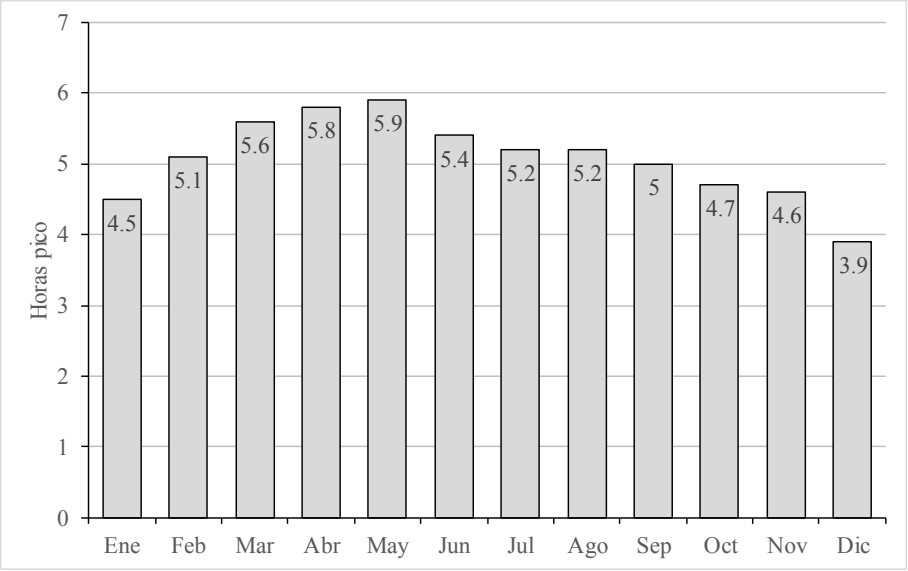


Figura 6. Horas pico mensual en el Estado de México durante 2016.

Se puede observar que durante los meses de abril y mayo se tiene la mayor cantidad de horas de radiación en el Estado de México y el mes de diciembre es el que presenta la menor cantidad de horas de radiación.

Ángulo de inclinación de los paneles solares o módulos

El Estado de México se encuentra a una latitud de 22°45'-18°55' y una longitud de 101°28'-105°42'. Tomando una latitud de 20°50' esto representa 20.83°, además, los módulos serán fijos durante todo el año por lo que el ángulo de inclinación para los módulos fijos será de 18.75°.

$$\text{Á}ngulo\ de\ inclianaci\text{ó}n\ para\ los\ m\text{ó}dulos\ fijos = 20.83°(0.9) = 18.75°$$

Determinación del número de módulos necesarios

A partir del consumo energético diario, E_c, que se puede tener a partir de los datos del consumo de las instalaciones en funcionamiento, y que debe obtenerse a partir de previsiones de consumo para las instalaciones que se proyectan, se aplica un factor global de rendimiento, f_r, de la instalación fotovoltaica que engloba los rendimientos particulares del regulador, el acumulador y el convertidor, que se tomará:

Para instalaciones con suministro en ca $f_r = 0.75$

Para instalaciones con suministro en cc $f_r = 0.80$

La energía diaria necesaria será

$$E_n = \frac{E_c}{f_r}$$

Para calcular la radiación incidente utilizaremos las técnicas explicadas en el módulo anterior y obtendremos el número de horas solares pico diarias, h_{sp}, a partir de la irradiación captada por los paneles inclinados. Así, utilizando la intensidad estándar para el Estado de México es de 800 W/m^2 y expresando la radiación, G_t, en kWh/m^2•día, los valores numéricos de la irradiación y de las horas solares pico coinciden.

El número de módulos, n_m, necesarios para la instalación considerada se podrá determinar a partir de la potencia pico del módulo, P_{max} y de las horas solares pico, h_{sp} del emplazamiento a través de la siguiente expresión

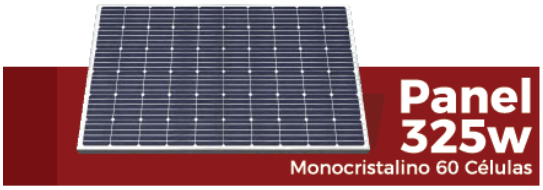
$$n_m = \frac{E_n}{P_{max} \cdot h_{sp}}$$

El consumo eléctrico diario para el invernadero automatizado es de E_c = 3.745 kWh/día. En este caso no se prevé utilizar corriente alterna. El mes con la irradiación más baja es el mes de diciembre con G_t = 3.9 kWh/m^2•día.

El panel solar por utilizar es fabricado en México por la empresa SAYA y presenta las siguientes características.

SAYA
Fabricante de Paneles Solares

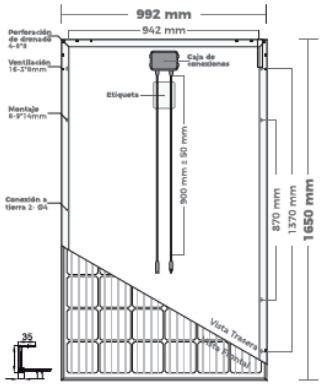
FICHA TÉCNICA



Características Eléctricas	SAYA-325M-60
Potencia Máxima (Pmax)	325W
Voltaje Potencia Máxima (Vm)	33.42V
Corriente Potencia Máxima (Im)	9.38A
Voltaje Circuito Abierto (Voc)	40.08V
Corriente Corto Circuito	9.85A

Las especificaciones aplican a en condiciones estándar (STC). El nivel de irradiación de 1,000W/m2 con espectro AM 1.5 y temperatura de 25°C.

Célula Solar	Mono cristalino 156*156mm
Tolerancia (Pmax)	0 ~ +3%
Número de Células	60 células por serie
Dimensiones	1650*992*45mm
Peso	19.5kg
Voltaje Máximo	1000V(TUV)/600V(UL)
Corriente Máxima	15A
Cable	PV 4mm2
Longitud del cable	90cm±5
Número de diodos	6
Temperatura de operación	(-40 ~ 85°C)
NOCT	47°C ±2°C
Coeficiente de temp. de Isc	+(0.053±0.01)%/K
Coeficiente de temp. de Voc	-(0.35±0.001)%/K
Coeficiente de temp. de Pmax	-(0.40±0.05)%/K



Curva I-V de módulo SAYA-325M-60 a varias temperaturas

Curva I-V de módulo SAYA-325M-60 a distintas radiaciones solares

Es así que, la P_{max} = 325W para el panel solar que se desea utilizar. El número de módulos necesarios son:

$$E_n = \frac{E_c}{f_r} = \frac{3.745}{0.8} = 4.681 \frac{kWh}{dia} = 4681 \frac{W \cdot h}{dia}$$

$$h_{sp} = \frac{G_t}{S_{std}} = \frac{3.9 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia}}{1 \frac{kW}{m^2}} = 3.9 \frac{h}{dia}$$

$$n_m = \frac{E_n}{P_{\max} \cdot h_{sp}} = \frac{4681}{325 \cdot 3.9} = 3.69 \cong 4$$

Es así que se necesitan 4 módulos para abastecer la energía eléctrica del invernadero que está proyectando para la producción de hongos en el Estado de México

Aspectos administrativos

Invernadero metálico

De acuerdo con el Programa Especial para la Seguridad Alimentaria PESA-México el presupuesto de materiales, equipos y mano de obra del invernadero metálico se muestra en la siguiente Figura 7.

Longitud (metros):	30	Distancia entre plantas (cm)		25
Amplitud (metros):	7	Distancia entre surcos (cm)		60
Área total (m2)	210.00	Número de plantas		1,160
Concepto (activos fijos)	**Cantidad**	**Unidad**	**Precio unitario**	**Costo**
Materiales estructura				
Tubo PTR galvanizado cal. 14, 1 1/2"x1 1/2"	63	pieza	254.15	16,011.45
Tubo PTR galvanizado cal. 14, 1 1/4"x1 1/4"	57	pieza	215.05	12,257.85
Polietileno Cal. 720, 8.2 ancho	1	rollo	9457.3	9,457.30
Malla antiáfido 25x40 mesh, 1.80 ancho	1	rollo	3680	3,680.00
Polygraf	45	Pieza	$70.00	3,150.00
Resorte Poligraf	20	kg	$35.00	700.00
Pijas Punta de Broca	20	Pieza	$20.00	400.00
Electrodo	20	Pieza	$32.00	640.00
Cemento	10	bulto	$95.00	950.00
Alambre Galvanizado	50	kg	$25.00	1,250.00
Bisagra de Acero	3	Pieza	$3.00	9.00
Sistema de riego				
Tinaco 1100 lt	2	pieza	1380	2,760.00
Tuberías y conexiones	1	lote	5533	5,533.00
Mano de obra				0.00
Construcción del invernadero	87	jornales	150	13,050.00
			TOTAL	69,848.60

Figura 7. Presupuesto para la construcción de un invernadero metálico

De acuerdo con esto se actualizaron los costos a 2025 aumentando en un 25% por lo que el Presupuesto total sería de $87,310.75.

Costos de producción del cultivo

El costo de cultivar el hongo durante 2 años en un invernadero de 210 m^2 se presenta en la siguiente Figura 8, donde se observa que el costo total es de $16,206.00.

Concepto	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Costo
Insumos				
Abono de composta	2000	kg	$1.50	3,000.00
Plantas de jitomate	2280	planta	$0.70	1,596.00
Rafia tomatera	8	rollo	$45.00	360.00
Mano de obra				0.00
Manejo del cultivo	150	jornales	$75.00	11,250.00
			TOTAL	**16,206.00**

Figura 8. Presupuesto para cultivar hongos por 2 años

Sistema de monitoreo y control

En la siguiente Figura 9 se presenta la cotización del sistema de monitoreo y control el cual se modificará para efectos del presente proyecto. Se muestra que el costo total del sistema será de $519,680.00.

Dra. Maria Teresa Torres Mancera
TECNOLOGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO
Av. 16 de septiembre # 54
Col. Cabecera Municipal
C.P. 55700 Coacalco de Berriozábal, Edo. Mex.
(55) 21594324 X 150
58044712
te1982re@gmail.com

PRECIO: LAB México D.F. en M.N.
Válido 10 dias.
ENTREGA: 8 semanas.
PAGO: BANAMEX
Cta No. 4090 - 116413
CLABE: 002180409001164134

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	PROTEC-9711 METABOLIMETRO SISTEMA DE EVALUACION DE OXIGENO, BIOXIDO DE CARBONO, ETANOL Y FLUJO, ACCESO REMOTO POR INTERNET, REGISTRO DE LECTURAS HISTORICAS NO VOLATILES, CONSISTENTE EN:	$448,000.00	$448,000.00
1	PROTEC-9703 MODULO DE ADQUISICION DE DATOS ANALOGICO-DIGITAL-BINARIO, DATALOGGER 400,000 LECTURAS, DISPLAY DIGITAL, SALIDA CONTROL RELAY, ALARMA ZUMBADOR LOCAL, CANALES DE ENTRADA PROGRAMABLES, ALIMENTACION 24 VDC.		
1	PROTEC-9704 ELEMENTO DE TRANSDUCCION EN VARIABLE DE MEDICION DE FLUJO DE AIRE CON SALIDA PROPORCIONAL ELECTRICA PARA ACOPLAMIENTO A ADQUISIDOR DE SEÑAL ANALOGICA.		
1	PROTEC-9705 ELEMENTO DE TRANSDUCCION EN VARIABLE DE MEDICION DE O2 CON SALIDA PROPORCIONAL ELECTRICA PARA ACOPLAMIENTO A ADQUISIDOR DE SEÑAL ANALOGICA.		
1	PROTEC-9706 ELEMENTO DE TRANSDUCCION EN VARIABLE DE MEDICION DE CO2 CON SALIDA PROPORCIONAL ELECTRICA PARA ACOPLAMIENTO A ADQUISIDOR DE SEÑAL ANALOGICA.		
1	PROTEC-9714 ELEMENTO DE TRANSDUCCION EN VARIABLE DE MEDICION DE ETANOL CON SALIDA PROPORCIONAL ELECTRICA PARA ACOPLAMIENTO A ADQUISIDOR DE SEÑAL ANALOGICA.		
1	PROTEC-9707 MATRIZ DE VALVULAS DE 3 VIAS ENTRADA, MEDICION, VENTEO, REEMPLAZABLES INDEPENDIENTEMENTE, CON ARREGLO DE 2 NIVELES PARA DISMINUCION DE VOLUMEN MUERTO.		
1	PROTEC-9713 MODULO DE CONTROL RELAY 1P2T PARA CODIFICACION Y AUTOMATIZACION DE MATRIZ DE VALVULAS, CON SALIDAS BINARIAS EN CONTACTO SECO.		
1	PROTEC-9715 COMPUTADOR WINDOWS, PANTALLA PLANA, TARJETA DE RED LAN, PUERTO USB, DISCO DURO, PROGRAMA DE APLICACIÓN ESPECIFICO PARA OPERACIÓN Y CONTROL DE METABOLIMETRO.		
GARANTIA DE 12 MESES FECHA FACTURA		SUBTOTAL	$448,000.00
		+ 16 % I.V.A.	$71,680.00
		TOTAL	$519,680.00

Figura 9. Cotización del sistema de monitoreo y control, empresa PROTEC

Costo de los paneles solares

De acuerdo a la cotización de la empresa SAYA el Panel 325W Monocristalino de 60 células tiene un costo de $15,790.00. Anteriormente se calculó que se necesitaban 4 módulos, es así que, el costo total es de $63,160.00

$$\boldsymbol{Costo} = (\$\mathbf{15,790.00}/\boldsymbol{módulo})(\mathbf{4}\ \boldsymbol{módulos}) = \$\mathbf{63,16}$$

CONCLUSIONES

La integración de sistemas de energía solar fotovoltaica en invernaderos automatizados destinados al cultivo de hongos representa una solución innovadora y sostenible frente a los retos energéticos y ambientales de la agricultura moderna. Al aprovechar una fuente de energía limpia y renovable, es posible reducir significativamente el consumo de combustibles fósiles y los costos operativos, al tiempo que se garantiza un control más preciso de las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo óptimo de los hongos.

Además, la automatización basada en energías renovables no solo mejora la eficiencia del proceso productivo, sino que también promueve la independencia energética de los productores y abre nuevas oportunidades para el desarrollo de tecnologías agrícolas en zonas rurales o con acceso limitado a infraestructura eléctrica. Este enfoque interdisciplinario, que combina ingeniería, sostenibilidad y producción agroalimentaria, fortalece la resiliencia del sistema agrícola ante los desafíos del cambio climático y la demanda creciente de alimentos saludables.

En conclusión, el uso de energía solar para la automatización de invernaderos en la producción de hongos no solo es viable, sino también altamente recomendable desde una perspectiva técnica, económica y ambiental. Su implementación puede ser un paso clave hacia una agricultura más inteligente, eficiente y respetuosa con el entorno.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arancibia B.C. y Best y Brown R. (2010). Energía del Sol. Ciencia. pag 10-17.
2. Camarena-Ibarrola, A., Hernández-González, A. A., & Gutiérrez-Rodríguez, E. (2021). Automatización y monitoreo de invernaderos utilizando energías renovables: Avances y desafíos en América Latina. Revista de Ingeniería y Tecnología, 12(3), 45–59.
3. CONAE (2007). Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Energía Solar: Estado actual en México, Programas de la CONAE. Taller práctico sobre energía renovable.
4. Electric Light & Power (2012). Mexico photovoltaic project to sell electricity to CFE
5. Estrada G.C.A. y Arancibia B.AC.A. (2011). Las energías renovables: La energía solar y sus aplicaciones. Revista Digital Universitaria 11(10):1-27.
6. Flores L. (2016) Aura Solar, 20 meses con el switch apagado. El Economista.
7. INEGI (2024). Instituto Nacional de Estadística y Geografía
8. Martínez Strevel R. (2013) Photovoltaic in Mexico-Recent Developments and Future. Butecsa.
9. Mondragón S.L. (2005). Producción de jitomate en invernadero. Secretaria de Desarrollo Agropecuario. Gobierno del Estado de México
10. Patente No. 336733 (2016). Sistema de Respirometría con administración remota para el monitoreo en línea de la concentración de CO2 y O2 y flujo de gases de salida en procesos biológicos.
11. PESA (2007). Programa Especial para la Seguridad Alimentaria. Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas
12. Prospectivas de Energías Renovables 2016-2030. Secretaría de Energía (SENER)
13. Royse, D. J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current overview of mushroom production in the world. In Z. Chang & P. G. Miles (Eds.), Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications (pp. 5–13). Wiley Blackwell.
14. Sonora Energy Group. (2012). Sonora Energy to Build 39 MW Solar Project in Mexico Archivado desde el original el 22 de enero de 2012.

EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO ÁCIDO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE APIO

Sarai Camarena Martínez[1], Leslie Pola Tonanzin Fuentes Estrada[1], Graciela M.L. Ruiz Aguilar[1], Servando Reyes Castro[1], María Elena López Pérez[1], Juan Humberto Martínez Martínez[2],

[1]División Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato; [2]Tecnológico Nacional de México – ITS de Abasolo

s.camarena@ugto.mx

RESUMEN

El biogás es una fuente de energía renovable que ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. También es una alternativa que promueve el desarrollo de las comunidades rurales, ya que puede generarse a partir de residuos agrícolas mediante el proceso de digestión anaerobia (DA). En particular, el cultivo de apio se siembra principalmente en los estados de Guanajuato, Baja California y Sonora y está disponible todo el año gracias a los ciclos de producción de invierno y primavera. En 2022, se calcula que la producción de apio alcanzó las 56 mil toneladas, generando una considerable cantidad de biomasa residual. Los residuos de apio están constituidos por celulosa, hemicelulosa y lignina que dificultan su degradación a través del proceso convencional de DA. Por ello, se hace necesario la implementación de una etapa de pretratamiento para mejorar la biodegradabilidad del sustrato y, por ende, los rendimientos de producción de biogás. Este estudio evaluó la viabilidad del pretratamiento ácido con H_2SO_4 para mejorar la producción de biogás a partir de residuos de apio. Para ello. los restos vegetales se recolectaron de una empresa alimenticia en Irapuato, Guanajuato, México. Se secaron y molieron antes de su uso. El inóculo para realizar los ensayos de DA se obtuvo de un biodigestor alimentado con estiércol vacuno. La experimentación se realizó en dos etapas (Experimento A y Experimento B). En el Experimento A se evaluó la producción de biogás a través de la DA de residuos de apio sin pretratar. Las variables que se consideraron en este experimento fueron la proporción de sustrato respecto al inóculo (relación S/I) (1:1, 2:1 y 4:1) y la concentración del inóculo (250 y 500 g/L). En el Experimento B se analizó la producción de biogás a partir de la DA de residuos de apio pretratados. Las variables consideradas fueron la dosis de H_2SO_4 (0.1% y 2.0% v/v), la temperatura (ambiente y 60°C) y el tiempo de pretratamiento (2 y 4 horas). En el Experimento A, la mayor producción de biogás (336.7 mL/g SV) se obtuvo con la relación S/I de 1:1 y usando una concentración de 500 g/L de inóculo. Relaciones más altas de S/I redujeron la producción, probablemente debido a la acidificación del sistema. En el Experimento B, el pretratamiento con H_2SO_4 al 0.1% v/v aplicado por 2 h a temperatura ambiente fue la mejor condición (487.1 mL/g SV), superando en 1.4 veces la producción del sustrato sin pretratar. En cambio, el uso de H_2SO_4 al 2.0% v/v mostró menor eficiencia, posiblemente por la generación de compuestos que inhiben el proceso de DA. Se concluye que el pretratamiento ácido mejoró significativamente la producción de biogás y que la concentración óptima de H_2SO_4 fue del 0.1% v/v, sin que el tiempo de pretratamiento o la temperatura de incubación afectaran significativamente. Gracias a la sencillez de este método, puede implementarse a nivel industrial para optimizar la transformación de residuos de apio en energía renovable. Sin embargo, se sugiere llevar a cabo estudios de viabilidad económica antes de su aplicación.

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos agrícolas es un desafío significativo en la actualidad. Actualmente, estos residuos se gestionan de diversas formas: una parte se utiliza como alimento para animales, otra se incorpora al suelo como enmienda orgánica, y una fracción se deja descomponer en el campo, lo que puede aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero y favorecer la aparición de plagas o enfermedades. Además, una proporción considerable se quema in situ, lo que tiene un impacto negativo en el medio ambiente (Bhatia & Sindhu, 2024).

El apio es un cultivo ampliamente distribuido, que a su vez genera una gran cantidad de biomasa residual. En México, de acuerdo con información del SIAP, la producción en el año 2023 se concentró en diez estados, con un volumen de 61, 256 t, pero los principales productores fueron Baja California con 11, 403.86 t, Guanajuato con 17, 436.91 t y Sonora con 18, 397 t, aportando estos tres estados el 77% de la producción nacional (SIAP, 2023).

El apio debe transportarse a una temperatura de 0 ºC y una humedad relativa del 98 al 100% para alargar su vida de anaquel (USDA, 1995), cuando estas condiciones no se cumplen pueden registrarse pérdidas de hasta un 55% por descarte (Ferrato, et al. 2012) lo que podría significar un volumen de 33, 690 t a nivel nacional y 9,590 t sólo en el estado de Guanajuato que podrían ser aprovechadas para la producción de biogás a través de diferentes procesos.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y un lodo digerido rico en nutrientes. El biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, es una fuente de energía renovable que puede generar electricidad, calor o purificarse para usarlo como combustible vehicular (Deublein y Steinhauser, 2008). Entre los beneficios de la digestión anaerobia se encuentran la reducción de residuos orgánicos, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, y la producción de energía renovable y biofertilizantes (Wellinger et al., 2013).

El uso de la digestión anaerobia para tratar los residuos de apio se justifica por varias razones. Primero, estos residuos tienen una alta proporción de materia orgánica que puede transformarse eficientemente en biogás. Segundo, al tratar estos residuos mediante digestión anaerobia, se mitiga su impacto ambiental. Finalmente, el lodo digerido resultante puede ser utilizado como biofertilizante, cerrando así el ciclo de nutrientes y mejorando la sostenibilidad agrícola.

No existe mucha información respecto al uso de residuos de apio (RA) para la producción de biogás. Los estudios disponibles se enfocan en la co-digestión de restos vegetales de apio con lodo anaerobio (Fang et al., 2013; Dai et al., 2015). En las investigaciones de Fang et al. (2013) y Dai et al. (2015) se informó que el uso de tallos de apio no provocó inhibición por acidificación durante el proceso. Además, se observó una mayor producción de biogás al emplear tallos de apio en comparación con otros residuos domésticos evaluados, como grasa de carne, soja y arroz.

Por otra parte, los RA se distinguen por su elevado contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que los convierte en compuestos de difícil descomposición a través del proceso de digestión anaerobia (Zheng et al., 2014). Para mejorar su utilización y aumentar los rendimientos de biogás durante este proceso, es posible emplear pretratamientos químicos que modifiquen la estructura del material lignocelulósico, facilitando así su descomposición por microorganismos anaerobios (Zheng et al., 2014; Atelge et al., 2020). Sin embargo, la información disponible sobre el uso de pretratamientos para optimizar la producción de biogás a partir de RA es aún muy limitada.

El objetivo de este proyecto fue evaluar la viabilidad de utilizar RA sin pretratar y RA pretratados con ácido sulfúrico para producir biogás a través de la digestión anaerobia. Esta investigación no solo contribuye a la gestión sostenible de residuos agrícolas, sino que también promoverá el uso de energías renovables y la economía circular en el sector agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección del sustrato

Los RA se recolectaron de una empresa alimenticia ubicada en la comunidad San Vicente de Malvas en el municipio de Irapuato, Guanajuato, México. El sustrato se colocó en una bandeja bajo el sol por 7 días a una temperatura que fluctuó entre 15 a 29 °C. Posteriormente, el sustrato semi húmedo se secó en horno a una temperatura de 85°C por 24 horas. Los residuos secos fueron molidos en un molino de granos y se tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 0.85 mm.

Caracterización fisicoquímica de sustrato e inóculo

La determinación de pH se realizó de acuerdo con el método descrito por Kang et al., 2014. La determinación de carbohidratos estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) se hizo mediante la metodología reportada por van Soest et al., (1973) y el contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) se determinó según los métodos estándares (APHA, 2005). En las Tablas 1 y 2 se indican la caracterización fisicoquímica de RA y de inóculo, respectivamente.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de RA.

Parámetros	RA
Celulosa (%)	20.2 ± 7.2
Hemicelulosa (%)	6.4 ± 0.8
Lignina (%)	2.2 ± 1.1
ST (%)	96.0 ± 0.5
SV (%)	69.9 ± 0.7
pH	5.8

Tabla 2. Caracterización física del inóculo.

Parámetro	Inóculo
ST (%)	1.335 ± 0.259
SV (%)	0.733 ± 0.148
pH	7.2

Diseño experimental

Se hicieron dos experimentos consecutivos: experimento A y experimento B. En el experimento A se probaron diferentes proporciones de sustrato (S) con respecto a inóculo (I) (S/I de 1:1, 2:1 y 4:1) y dos concentraciones de inóculo (250 y 500 g/L) para evaluar su efecto sobre la producción de biogás (Tabla 3). En este experimento los RA no fueron sometidos a ningún tipo de pretratamiento químico. Se llevaron a cabo dos réplicas de cada tratamiento.

Tabla 3. Tratamientos incluidos en el experimento A para evaluar la producción de biogás a partir de RA no pretratado.

Tratamiento	Concentración de inóculo (g/L)	Relación S/I
A1	250	4:1
A2	250	2:1
A3	250	1:1
A4	500	4:1
A5	500	2:1
A6	500	1:1

El experimento B consistió en analizar la producción de biogás a partir de RA pretratados químicamente. Para ello, se evaluaron dos concentraciones de H_2SO_4 (0.1 y 2.0% v/v), temperaturas (ambiente y 60 °C) y periodos de incubación (2 y 4 h). En este experimento se usó la relación S/I de 1:1 y una concentración de inóculo de 500 g/L. En la Tabla 4 se indican los tratamientos incluidos para realizar la segunda etapa experimental. Se llevaron a cabo dos réplicas de cada tratamiento.

Tabla 4. Tratamientos incluidos en el experimento B para evaluar la producción de biogás a partir de RA pretratado.

Tratamiento	Dosis (% v/v)	Temperatura (°C)	Tiempo de incubación (h)
B1	0.1	Ambiente*	2
B2	0.1	Ambiente*	4
B3	0.1	60	2
B4	0.1	60	4
B5	2.0	Ambiente *	2
B6	2.0	Ambiente*	4
B7	2.0	60	2
B8	2.0	60	4

*La temperatura ambiente es aproximadamente de 24 °C.

Ensayos de biogás

Los experimentos de producción de metano se realizaron en botellas serológicas de 120 mL de volumen total y un volumen de trabajo de 80 mL en un régimen en lote durante un periodo de incubación de 30 días. A las mezclas se añadió la cantidad correspondiente de sustrato e inóculo en base a la relación S/I manejada. El control negativo consistió en la mezcla de inóculo en agua corriente sin añadir sustrato.

El volumen de biogás producido se determinó por el principio de desplazamiento de líquido usando solución de HCl (pH < 2.0). El volumen desplazado se consideró igual a la producción de biogás. Los reactores se agitaban manualmente al momento de realizar la medición de gas. Se hizo triplicado por cada tratamiento.

Pretratamiento ácido

En los pretratamientos se utilizó ácido sulfúrico concentrado. Las condiciones específicas de pretratamiento se establecieron según lo indicado en la Tabla 4. Para los tratamientos realizados a 60 °C, se utilizó una parrilla de calentamiento magnética para mantener el sustrato en constante agitación, y la temperatura se controló con un termómetro de mercurio para asegurar su estabilidad durante todo el periodo de incubación. Por otro lado, los tratamientos que no requerían calentamiento se agitaron únicamente con un agitador magnético.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de biogás en el experimento A

El tratamiento A6 (correspondiente a las condiciones de relación S/I 1:1 y 500 g/L de inóculo) muestra la mayor producción acumulada de biogás (336.7 mL/g SV después de 720 h de incubación), indicando que esta combinación favorece la generación de biogás. El siguiente tratamiento con mayor producción (296.5 5 mL/g SV) fue A3, el cual se llevó a cabo aplicando las condiciones de S/I 1:1 y 250 g/L de inóculo. Por lo que la relación S/I más favorable para producir biogás a partir de RA fue 1:1. Esto concuerda con lo mencionado por Khadka et al., (2022), los cuales mencionan que la

relación S/I de 1:1 fue la más favorable para obtener los más altos rendimientos de producción de biogás a partir de residuos de comida. Ellos evaluaron los valores de S/I de 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Los tratamientos en los que se usó la relación S/I 4:1 (A1 y A4) presentaron los rendimientos acumulados más bajos (100.6 y 69.2 mL/g SV después de 720 h de incubación, respectivamente). Esto sugiere que una alta carga de sustrato respecto al inóculo pudo haber limitado la actividad microbiana debido a la acumulación de inhibidores o una menor disponibilidad de microorganismos activos para consumir el sustrato (Camarena-Martínez et al., 2020; Al-Iraqi et al., 2024). Camarena-Martínez et al., (2020) evaluaron los valores S/I de 0.5, 1.0 y 2.0 usando residuos de planta de jitomate y encontraron que conforme se incrementaba el valor, la producción de metano disminuyó. Ellos reportaron una inhibición del proceso a una S/I de 2.0. Por otro lado, Al-Iraqi et al., (2024) probaron la codigestión de residuos de alimentos y carrizo común (*Phragmites australis*) usando los valores de relación S/I de 4:1, 2:1 y 1:1. Ellos reportaron que a una relación S/I de 4:1 se presentó una acumulación de ácidos grasos volátiles lo que provocó la acidificación del sistema y, por ende, una disminución en la producción de biogás.

Todos los tratamientos presentan un aumento rápido en la producción de biogás durante las primeras 200 horas, seguido de una disminución en la tasa de acumulación. Esto refleja una fase inicial de adaptación y actividad metabólica intensa, seguida de una reducción en los compuestos fácilmente biodegradables. La Figura 1 presenta la acumulación de biogás en función del tiempo para diferentes tratamientos realizados con RA como sustrato.

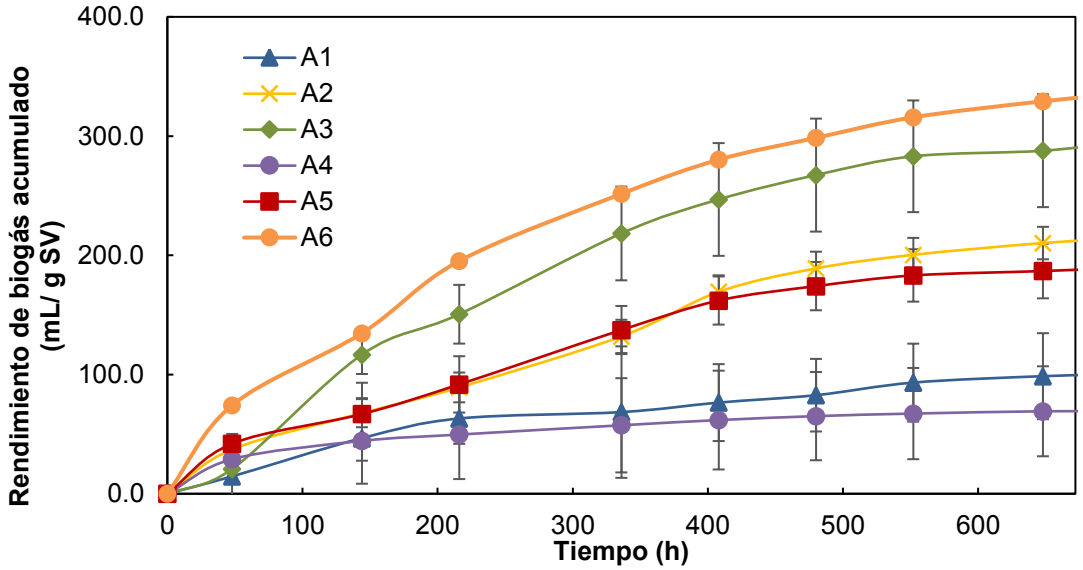


Figura 1. Rendimiento de biogás acumulado (mL/g SV) para cada tratamiento del Experimento A utilizando RA como sustrato.

Remoción de sólidos totales y volátiles en el experimento A

En todos los tratamientos se logró disminuir el contenido de sólidos (Figura 2). La concentración de inóculo a 500 g/L resultó más favorable cuando se aplicó una relación S/I baja (1:1). Sin embargo, cuando la relación S/I se incrementó (2:1 y 4:1), resultó perjudicial. Esto podría deberse a que en estas condiciones el contenido de ST es mayor. Se ha reportado que, al aumentar el contenido de sólidos en la mezcla, disminuye la producción de biogás. Cabe mencionar que el porcentaje de sólidos tolerable dependerá del tipo de sustrato. Por ejemplo, Tsunatu et al. (2014) reportaron que la mayor producción de biogás se logró con un 9% ST al utilizar tres tipos de sustratos: cáscara de maní, mazorcas de maíz y paja de arroz. Sin embargo, al aumentar la concentración de sólidos al 12%, la producción de biogás disminuyó.

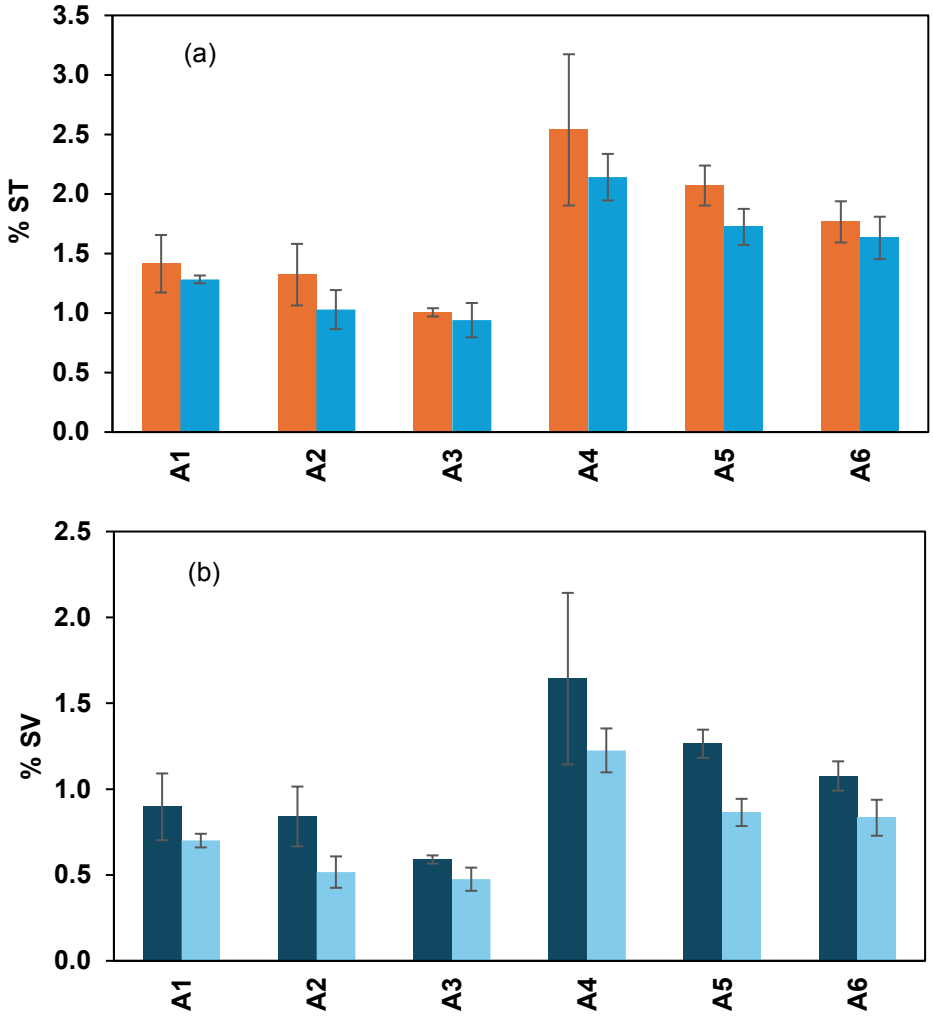


Figura 2. Contenido porcentual de (a) sólidos totales (ST) y (b) sólidos volátiles (SV) para cada tratamiento del Experimento A utilizando RA como sustrato.

Producción de biogás en el experimento B

En todos los tratamientos del experimento B se usó una relación S/I 1:1 y una concentración de inóculo de 500 g/L, ya que fue en estas condiciones en las que se obtuvo el más alto rendimiento de biogás durante el experimento A.

La Figura 3 muestra los rendimientos de biogás clasificados según la concentración de ácido sulfúrico utilizada para pretratar los RA. En los tratamientos con una concentración de H_2SO_4 al 0.1% (v/v), la mejor condición se alcanzó con un tiempo de incubación de 2 horas a temperatura ambiente (B1), logrando un rendimiento de 487.1 mL/g SV. Por otro lado, en los tratamientos con una concentración de H_2SO_4 al 2.0% (v/v), el resultado más favorable se obtuvo con un tiempo de incubación de 4 horas a 60 °C (B8), alcanzando un rendimiento de 390.2 mL/g SV. Las condiciones menos efectivas se observaron cuando se utilizó H_2SO_4 al 2.0% (v/v) durante un tiempo de incubación de 2 horas a 60 °C. En estas condiciones se logró un rendimiento de 231.4 mL/g SV. En términos generales, la concentración de H_2SO_4 al 0.1% (v/v) resultó ser más eficiente, ya que en todos los tratamientos donde se empleó se lograron rendimientos superiores en comparación con

aquellos en los que se utilizó una concentración del 2.0% (v/v). Esto podría deberse a que a más altas concentraciones de ácido puede provocar una mayor generación de compuestos inhibidores de la metanogénesis como furfural y furanos (Wang et al., 2017; Jilani et al., 2023). El tiempo y temperatura de incubación del pretratamiento ácido no parecen ser parámetros que afecten significativamente en la producción de biogás.

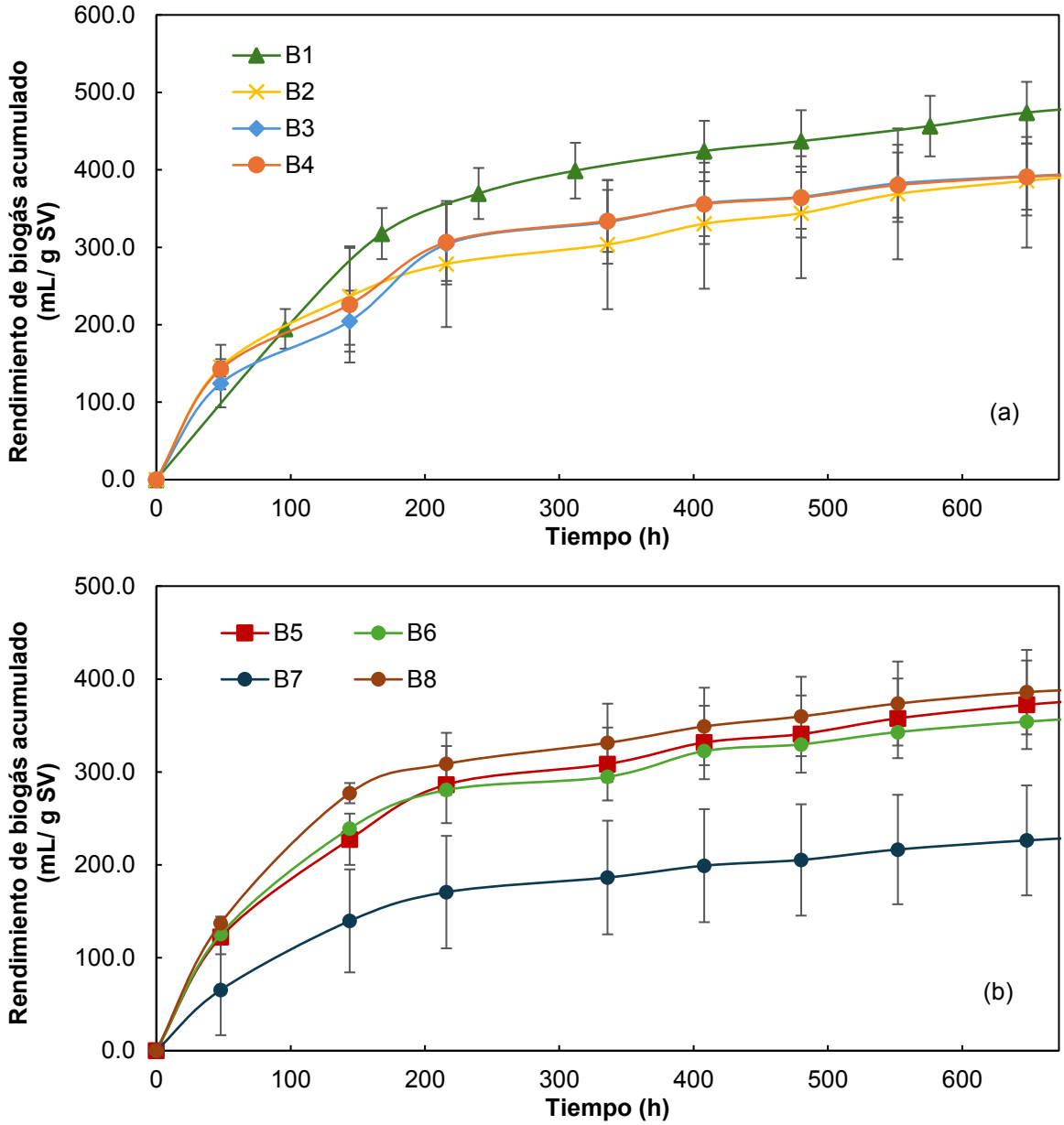


Figura 3. Rendimiento de biogás acumulado (mL/g SV) para cada tratamiento del Experimento B de acuerdo con la concentración de H_2SO_4, (a) 0.1% v/v y (b) 2.0% v/v, utilizando RA como sustrato.

Los rendimientos de biogás alcanzados en los tratamientos del experimento B (con excepción de B7) oscilaron entre 360 y 487 mL/g SV, superando el mayor rendimiento obtenido en el experimento A usando la relación S/I de 1:1 y una concentración de 500 g/L de inóculo (337 mL/g SV). Estos resultados concuerdan con lo reportado por otros autores los cuales indican que la aplicación del pretratamiento ácido mejora la producción de biogás a partir de sustratos lignocelulósicos (Zheng et al., 2014; Jankovičová et al., 2022). Jankovičová et al., (2022), reportaron que la aplicación de H_2SO_4

al 5% como pretratamiento permitió el incremento de biogás con respecto al control usando tres diferentes residuos agrícolas, paja de colza, desechos de maíz y paja de trigo. Según la revisión de Zheng et al. (2014), en la mayoría de los casos, el uso de pretratamientos ácidos permite mejorar la producción de biogás a partir de sustratos lignocelulósicos, con incrementos que oscilan entre el 20 % y el 200 %.

CONCLUSIONES

En este estudio, el pretratamiento con ácido sulfúrico fue eficaz para aumentar la producción de biogás a partir de RA. La mejora alcanzada con el pretratamiento fue hasta 1.4 veces mayor con respecto al sustrato sin pretratar. La concentración más baja de ácido sulfúrico (0.1% v/v) resultó ser la más adecuada para este proceso. Considerando que el tiempo y la temperatura de incubación no tuvieron un impacto significativo en la producción de biogás, se recomienda utilizar las condiciones más simples de pretratamiento (2 horas a una temperatura ambiente de 24 °C). Esto representa una ventaja, ya que las condiciones estándar son más fáciles de implementar a escala piloto o industrial. Este trabajo de investigación promueve la generación sostenible de energía mediante el aprovechamiento de residuos que no suelen tener una disposición adecuada, pero tienen un alto potencial para ser valorizados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Al-Iraqi, A. R., Gandhi, B. P., Folkard, A. M., Barker, P. A., & Semple, K. T. (2024). Influence of inoculum to substrate ratio and substrates mixing ratio on biogas production from the anaerobic co-digestion of Phragmites australis and food waste. BioEnergy Research, 17(2), 1277-1287.
2. APHA, (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. APHA, Washington, DC.
3. Atelge, M. R., Atabani, A. E., Banu, J. R., Krisa, D., Kaya, M., Eskicioglu, C., ... & Duman, F. A. T. İ. H. (2020). A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. Fuel, 270, 117494.
4. Bhatia, T., & Sindhu, S. S. (2024). Sustainable management of organic agricultural wastes: contributions in nutrients availability, pollution mitigation and crop production. Discover Agriculture, 2(1), 1-42.
5. Camarena-Martínez, S., Martínez-Martínez, J. H., Saldaña-Robles, A., Nuñez-Palenius, H. G., Costilla-Salazar, R., Valdez-Vazquez, I., ... & Ruiz-Aguilar, G. M. (2020). Effects of experimental parameters on methane production and volatile solids removal from tomato and pepper plant wastes. BioResources, 15(3), 4763.
6. Dai, B., Xu, J., He, Y., Xiong, P., Wang, X., Deng, Y., ... & Yin, Z. (2015). Acid inhibition during anaerobic digestion of biodegradable kitchen waste. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 7(2).
7. Deublein, D. & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: an introduction. Ed. Wiley-VCH. Weinheim.
8. Fang, S. M., Dai, B. L., Yao, J. H., & Xia, P. (2013). Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Solid Waste and Activated Sludge. Applied Mechanics and Materials, 409, 231-234.
9. Ferrato, J., Firpo, I., Ortíz, M. M., Rotondo, R., Beltrán, C. 2012. Pérdidas poscosecha de hortalizas en negocios minoristas, con distintos sistemas de manejo, en Rosario, Santa Fe, Argentina. Horticultura Argentina, 31(75): 21-27.
10. Jankovičová, B., Hutňan, M., Czölderová, M. N., Hencelová, K., & Imreová, Z. (2022). Comparison of acid and alkaline pre-treatment of lignocellulosic materials for biogas production. Plant, Soil & Environment, 68(4).
11. Jilani, S. B., & Olson, D. G. (2023). Mechanism of furfural toxicity and metabolic strategies to engineer tolerance in microbial strains. Microbial Cell Factories, 22(1), 221.

12. Kang, J., Kim, K., Oh, G., & Rhee, S. (2013). Analysis on biochemical methane potential of agricultural byproducts with different types of silage storage. Journal of Material Cycles and Waste Management, 16(3), 468-474.
13. Khadka, A., Parajuli, A., Dangol, S., Thapa, B., Sapkota, L., Carmona-Martínez, A. A., & Ghimire, A. (2022). Effect of the substrate to inoculum ratios on the kinetics of biogas production during the mesophilic anaerobic digestion of food waste. Energies, 15(3), 834.
14. SIAP. 2023. Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado en línea el 18 de febrero de 2025. En https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.
15. Tsunatu D. Yavini*, Azuaga I. Chia, and Agabison John. (2014). Evaluation of the Effect of Total Solids Concentration on Biogas Yields of Agricultural Wastes. International Research Journal of Environment Sciences, Vol. 3(2), 70-75. Consultado el 17 de enero de 2025 en: https://www.isca.in/IJENS/Archive/v3/i2/10.ISCA-IRJEvS-2014-010.pdf
16. USDA. 1995. Métodos para el cuidado de alimentos perecederos durante el transporte por camiones. Manual de agricultura No. 669. Servicio de mercadeo agrícola, División de transporte y mercadeo. Consultado en línea el 19 de febrero de 2025. Disponible en: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Metodos%20para%20el%20Cuidado%20de%20Alimentos%20Perecederos.pdf.
17. van Soest, P.J., Robertson J.B., & Lewis B.A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Plysaccharides in Relation to Animal Nutrition. Journal of Dairy Sciences, 74, 3583-3597.
18. Wang, X., Gao, Q., & Bao, J. (2017). Enhancement of furan aldehydes conversion in Zymomonas mobilis by elevating dehydrogenase activity and cofactor regeneration. Biotechnology for Biofuels, 10, 1-9.
19. Wellinger, A., Murphy, J. & Baxter D. (2013). The biogas handbook: science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy, 52.
20. Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in energy and combustion science, 42, 35-53.

PRODUCCIÓN DE EMBRIONES DE OVINO POR FIV EN MEDIO SECUENCIAL SIMPLE

Javier Alejandro Gómez Guzmán[1], Demetrio Alonso Ambriz García[2], José Roberto Vázquez Avendaño[2], César Cortés Romero[3], Gaspar Manuel Parra Bracamonte[1], María del Carmen Navarro Maldonado[2*]

[1]Centro de Biotecnología Genómica, Instituto Politécnico Nacional, Reynosa, México. [2]Departamento de Biología de la Reproducción, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México. [3]Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México.
carmennavarro2006@yahoo.com.mx

RESUMEN

La producción *in vitro* de embriones enfrenta diversos retos, uno de ellos es el costo y la disponibilidad de los medios mejorados para el desarrollo, que hacen compleja su accesibilidad, aunado a la forma en que son presentados o a su permanencia en el mercado nacional por aspectos del libre comercio. Además, al basarse en formulaciones de patente que no permiten conocer su composición puntual, el adicionar otros elementos al medio puede no dar los resultados esperados en el desarrollo. Finalmente, los medios comerciales en su mayoría son complejos y vienen suplementados con albúminas, las que se ha visto que tienen un importante efecto en la incidencia del síndrome de nacimientos de crías gigantes (LOS por sus siglas en inglés Large Offspring Syndrome). Por lo que el objetivo de este estudio fue comparar un medio secuencial simple (SOF por sus siglas en inglés Synthetic Oviductal Fluid, In Vitro, S.A. México) con un medio continuo complejo de importación (BO-IVC de IVF-Biosciences, UK), en la producción de blastocistos ovinos por fertilización in vitro (FIV). Para ello, se obtuvieron ovarios de borregas sacrificadas en un rastro local, a partir de los cuales se obtuvieron ovocitos que se maduraron *in vitro* (MIV) en TCM-199 suplementado con hormonas (FSH y LH) y factor de crecimiento epidérmico (EGF), incubando a 38.5°C, 5%, CO_2 y humedad a saturación por 22hrs. Los ovocitos maduros (MII) fueron fertilizados ($2x10^6$ espermatozoides/100µL) con semen congelado en medio IVF por 22hrs. Los presuntos cigotos fueron desarrollados *in vitro* en medio SOF 1 y 2 o en medio BO-IVC durante 7 días, y comparados los resultados con prueba t-Student a nivel de significancia de 0.05. Se obtuvo una tasa de MIV de 88.8%±3.2 y a los 7 días de cultivo, se obtuvo 25.6%±5.1 de blastocistos en medio SOF 1 y 2 vs. 21±5% en medio BO-IVC (p=0.052). Se concluye que el desarrollo de blastocistos ovinos fue similar entre los medios utilizados, con la ventaja de que el SOF es un medio conocido, simple y económico. Agradecemos a Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana y al CONAHCyT (hoy SECIHTI), por los fondos otorgados para el desarrollo del proyecto de base tecnológica en proceso de maduración, y del proyecto de ciencia básica y de frontera C-459/2024, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

La producción *in vitro* de embriones enfrenta diversos retos, uno de ellos es el costo y la disponibilidad de los medios mejorados para el desarrollo, que hacen compleja su accesibilidad, aunado a la forma en que son presentados o a su permanencia en el mercado nacional por aspectos del libre comercio. Además, al basarse en formulaciones de patente que no permiten conocer su composición puntual, el adicionar otros elementos al medio puede no dar los resultados esperados en el desarrollo (Chronopoulou y Harper, 2015). Se han propuesto diferentes medios de cultivo de embriones ovinos según su etapa de desarrollo o disposición de nutrientes entre los más utilizados están el medio SOF (synthetic oviduct fluid) el cual simula las condiciones del oviducto y es utilizado actualmente en el cultivo de embriones, este medio puede utilizarse de manera secuencial o de manera continua (Walker *et al*., 1996). El medio KSOM (potassium simplex optimized medium) ha sido ampliamente utilizado de diversas maneras en el cultivo de embriones ovinos (Aghaz *et al*., 2016). El medio N2B27 el cual es un medio originalmente usado para el desarrollo, diferenciación y

mantenimiento de células madre embrionarias y de células madre pluripotentes inducidas, el cual ha sido probado en etapas avanzadas del desarrollo embrionario in vitro (Ramos-Ibeas *et al*., 2022).
Se han propuesto diversas estrategias para la optimización de los sistemas de producción de embriones *in vitro*, destacando el uso de suplementos como el suero fetal bovino (SFB) y la albúmina de suero bovina (BSA), sin embargo, el primero se ha asociado a efectos adversos como el "síndrome de crías grandes", mientras que la BSA, aunque más fisiológica, presenta limitaciones en la capacidad de eclosión de los embriones. Esto ha motivado el desarrollo de medios definidos, como los que incluyen alcohol polivinílico (PVA) pero éste causa perfiles metabólicos alterados en comparación a los embriones cultivados en BSA (Thompson *et al*., 1995; Sinclair *et al*., 1999).

Finalmente, los medios comerciales en su mayoría son complejos y vienen suplementados con albúminas, las que se ha visto que tienen un importante efecto en la incidencia del síndrome de nacimientos de crías gigantes (LOS) tal como los medios comerciales de Sigma-Aldrich – EmbryoMax® Modified DPBS con BSA y rojo fenol y el medio de cultivo de Stroebech Media. Este síndrome se manifiesta no solo por un crecimiento exacerbado de las crías, lo que conlleva al sufrimiento fetal y en las madres, a problemas de distocias, sino que va ligado a anormalidades en algunos órganos tales como corazón, riñón, pulmón, páncreas y lengua (Nava-Trujillo y Rivera, 2023). La abundancia anormal de ARN largos en fetos bovinos con síndrome de crías grandes, podría deberse a la expresión alterada de ARN no codificantes, como microARN y fragmentos de RNA de transferencia, cuya síntesis estaría regulada por la metilación del ADN y que afectan rutas clave relacionadas con el tamaño de órganos, proliferación celular y el ciclo de división celular (Li *et al*., 2019; Goldkamp *et al*., 2022ab).

El uso de medios de cultivo continuos presenta diversos beneficios y riesgos que deben considerarse cuidadosamente. Entre las ventajas, se destaca la reducción en la manipulación de las placas dentro de la incubadora, lo que favorece condiciones de cultivo más estables en cuanto a gases y temperatura. Asimismo, se disminuye el manejo celular, lo que reduce el riesgo de daño o pérdida de las células. Otro beneficio es la acumulación de factores autocrinos y paracrinos beneficiosos secretados por los propios embriones, así como la compatibilidad con incubadoras de nueva generación con tecnología time-lapse, lo que permite evaluar nuevos puntos de selección embrionaria. Además, este enfoque puede mejorar el flujo de trabajo al requerir menos tiempo del personal, lo que potencialmente se traduce en ahorro de costos. No obstante, también existen riesgos importantes. La permanencia prolongada del medio puede generar productos de degradación como amoníaco, agotamiento de sustratos y descomposición de otros componentes. La acumulación de compuestos orgánicos volátiles, tanto en el aceite como en el medio, también puede afectar negativamente el desarrollo embrionario. En incubadoras convencionales (sin time-lapse), la menor manipulación puede llevar a pasar por alto indicadores morfológicos importantes o señales de problemas en el cultivo. Además, en incubadoras secas, se puede producir evaporación del medio, lo que conlleva un aumento de la osmolaridad, del pH y de la concentración de solutos. Finalmente, también se debe considerar la posible degradación del aceite mineral utilizado para cubrir los medios, ya que puede sufrir peroxidación con el tiempo (Swain, 2019)

Por lo que el objetivo de este estudio fue comparar un medio secuencial simpleSOF por sus siglas en inglés Synthetic Oviductal Fluid, In Vitro, S.A. México) con un medio continuo complejo de importación (BO-IVC de IVF-Biosciences, UK), en la producción de blastocistos ovinos por fertilización *in vitro* (FIV).

PARTE EXPERIMENTAL

Colecta de ovocitos. Siguiendo la metodología descrita por Martínez *et al*. (2019) con algunas modificaciones, se colectaron ovocitos por aspiración/punción de folículos ováricos (de 2 a 5 mm de diámetro), provenientes de ovejas domésticas *Ovis aries* sacrificadas en un rastro local. Lo ovarios fueron transportados al laboratorio durante 2 h a temperatura de 30-35°C en solución salina (NaCl al 0.9%) y antibióticos al 1% (10.000 UI/mL de penicilina, 10 mg/mL de sulfato de estreptomicina y 25 µg/mL de anfotericina) (Antibac-Antifun 100x, In Vitro, SA, CDMX, México). Una vez en el laboratorio, los ovarios se lavaron 3 veces en solución salina isotérmica con antibióticos.

Posteriormente, los COC fueron colectados de los folículos, puncionándolos con jeringas de 10 mL conteniendo 0.5 a 1 mL de medio de colecta a base de TCM 199® con HEPES (25mM) suplementado con heparina (100UI/mL) y agujas calibre 20 G. Este medio se atemperó a 30°C 1 a 2 h antes. Los COC obtenidos se recuperaron en una caja Petri y se evaluaron bajo microscopio estereoscopio, seleccionándolos para su maduración *in vitro* (MIV) aplicando los criterios de la ASEBIR (2015).

Maduración *in vitro* (MIV) de ovocitos de ovino doméstico La MIV se llevó a cabo utilizando ovocitos que se maduraron *in vitro* (MIV) en TCM-199 suplementado con hormonas (FSH y LH) y factor de crecimiento epidérmico (EGF). Para ello, los COC se cultivaron en grupos de 25 a 30 en una caja de cuatro pozos (Nunc, Darmstadt, Alemania) conteniendo 400 µL de medio de MIV cubierto bajo aceite, incubándolos a 38.5°C y 5% de CO_2 en humedad relativa alta, durante 22 h (Martínez *et al*., 2019).

Fertilización *in vitro* (FIV) y Cultivo *in vitro* (CIV) de embriones ovinos
Una vez transcurrida la MIV, se evaluó la expansión de las células del cúmulo como dato subjetivo de maduración y los COC en MII fueron lavados en 50 µL de medio de fertilización BO-IVF™ (IVF Bioscience), atemperando a 38.5°C y cubierto con aceite mineral. Después los COC fueron transferidos a una caja de cuatro pozos conteniendo 400µL de medio BO-FIV™ atemperado y cubierto con aceite mineral, por cada pozo (Filipiak *et al*., 2017). En cuanto al semen, se utilizaron pajillas crioconservadas a -196°C (una pajilla de 0.25 mL por cada experimento) de ovinos fértiles, raza Dorper provenientes de Colegio de Posgraduados, Chapingo Campus San Luis Potosí, que se descongelaron en baño María a 38.5 °C, vaciando su contenido en tubos Eppendorf. Se tomaron 5 µL para evaluar la movilidad espermática post descongelación. De acuerdo con las sugerencias de IVF Bioscience, con el medio BO-SemenPrep™ (cat. #71003) se realizó un lavado a la muestra de semen en 500 µL en tubo Eppendorf, centrifugando a 300 rpm por 10 minutos y descartando el sobrenadante sin perder el pellet de espermatozoides. Se adicionaron 225 µL de medio BO-IVF™ (cat. #71004) al fondo del tubo y se centrifugó a 400 rpm por 3 minutos. Nuevamente se descartó el sobrenadante y se realizó la FIV de los ovocitos maduros (MII), con $2x10^6$ espermatozoides/100µL (lo que equivale a 50,000 espermatozoides por ovocito) de la muestra de semen descongelado, en medio IVF Bioscience, incubándolos a las condiciones descritas por 22 h. Una vez finalizada la FIV, se utilizó hialuronidasa (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania) para retirar las células del cúmulo y los remanentes de espermatozoides. De acuerdo con las sugerencias de IVF Bioscience con el medio BO-SemenPrep™ (cat. #71003) se realizó un lavado con 500 µL y se centrifugo a 300 rpm por 10 minutos al final se descartó el sobrenadante y sin perturbar a los espermatozoides al fondo se agregó un equivalente a 225 µL de medio BO-IVF™ (cat. #71004) y se centrifugo por 3 minutos a 400 rpm. Nuevamente se descartó el sobrenadante y con 1 µL por cada 10 ovocitos es que se realiza la inseminación por cada pozo. Aproximadamente un total de 50,000 espermatozoides por ovocito. Los ovocitos fertilizados (presuntos cigotos), comprobados por la presencia de dos cuerpos polares, fueron divididos en 2 grupos de tratamientos para su CIV.

Un grupo de presuntos cigotos (GC o grupo control) fueron lavados tres veces en 30 µL de medio BO-IVC™ (# 71005) y se transfirieron a una nueva caja de cultivo, colocando 25 cigotos por cada pozo en 400 µL del mismo medio, cubierto bajo aceite mineral e incubándolos a las condiciones descritas hasta el día 7 post FIV (Falchi y Zedda, 2022). Otro grupo de presuntos cigotos (GE o grupo experimental), fueron lavados tres veces en 30 µL de SOF1 (In Vitro, S.A., CDMX, México) y se transfirieron a una nueva caja de cultivo, colocando 25 cigotos por cada pozo en 400 µL del mismo medio, cubierto bajo aceite mineral e incubándolos a las condiciones descritas hasta el día 4 post FIV. Posteriormente, los embriones se evaluaron para determinar las diferentes etapas de la segmentación alcanzadas y se transfirieron a otra celda conteniendo 400 µL de SOF2 (In Vitro, S.A., CDMX, México) cubierto bajo aceite, incubándolos hasta cumplir 7 días de cultivo (Falchi y Zedda, 2022). Todos los medios de cultivo se pre-equilibraron a las condiciones descritas, al menos 2h antes de someter las células.

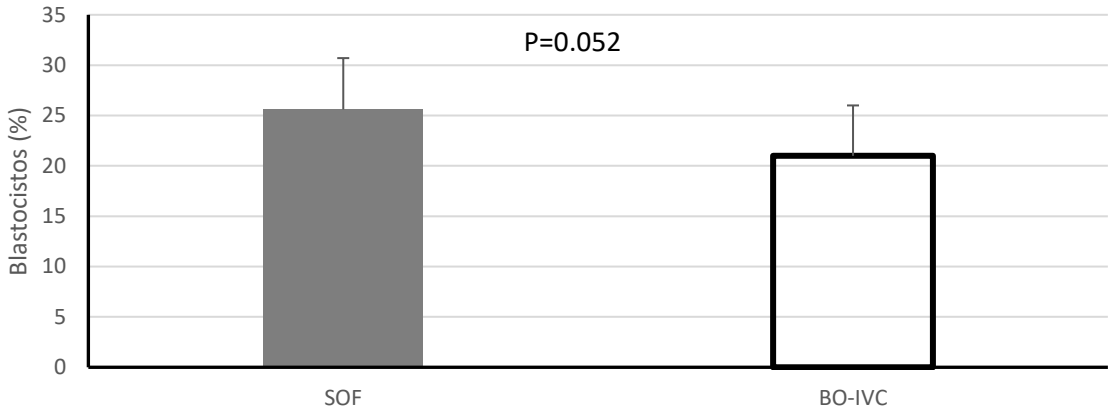
Un ciclo de producción de embriones que incluyera MIV, FIV y CIV (en los diferentes grupos tratados-GC o GE), se consideró una repetición. Dentro de la cual se estimó la realización de 3 repeticiones.

Los resultados se analizaron estadísticamente con prueba t-Student a nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS

Se obtuvo una tasa de MIV de 88.8%±3.2 con la utilización de un medio TCM-199 suplementado con hormonas (FSH y LH) y factor de crecimiento epidérmico (EGF). En la figura 1 se muestran los resultados de la producción de blastocistos obtenidos de 3 repeticiones de cada grupo. En el GC se cultivaron n = 67 presuntos cigotos y se obtuvieron 15 blastocistos (21%±5), mientras que en el GE se cultivaron n = 40 presuntos cigotos y se obtuvieron 10 blastocistos (25.6%±5.1), sin diferencias estadísticas a p = 0.052.

Figura 1. Porcentaje de blastocistos (Promedio±DE) obtenidos en medio secuencial SOF o contínuo BO-IVC, al día 7 de cultivo.



DISCUSIÓN

La utilización de medios comerciales con patente vigente, implica desconocer exactamente las cantidades y reactivos utilizados durante su elaboración, lo que puede ocultar respuestas al efecto de ciertos suplementos en los medios. Tal es el caso del medio de Bo-IVC de Ivfbioscience y de IVC Medium de Stroebech Media, entre muchos otros medios comerciales. Zandi *et al*. (2024) reportaron que la producción de blastocistos bovino utilizando el medio de IVC Medium de Stroebech Media no tuvo diferencia en comparativa con un medio Charles Rosenkrans con aminoácidos (mCR2aa), sin embargo, los autores recomiendan el uso de medio comercial para la producción de embriones in vitro.

Una de las desventajas de la producción *in vitro* (PIV) de embriones, es que muchas veces los medios de cultivo deben adquirirse del extranjero, lo cual incrementa sus costos. Tal es el caso de los medios IVC Medium de Stroebech Media cuyo valor oscila alrededor de $90 dólares, cerca de $1800 pesos mexicanos (https://www.pets-inc.com/catalog/product/ivf-opu-items/stroebech-ivf-media/stroebech-ivc-medium-for-bovine-20ml/). El medio de Bo-IVC de ivfbioscience con un valor aproximado de $1200 pesos mexicanos (https://www.lepsiprisma.com/).

En el presente estudio, el medio secuencial SOF, ofrece la ventaja económica por sobre del BO-Bioscience, en que se obtiene nacionalmente, mientras que el otro es de importación, lo que incrementa sus costos. Además, se conoce la formulación de los SOF mientras que el segundo, aún no vence su patente, por lo que desconocemos su formulación precisa y, al no mostrar diferencias

entre ambos medios sobre la tasa de blastocistos, el SOF garantiza la eficiencia en la PIV, pero a un menor costo.

Adicionalmente, el uso de medios secuenciales vs. los medios continuos ofrece la ventaja de que, al cambiar el medio en las etapas previas a la de blastocisto, es decir, hasta la etapa de mórula o mórula compacta, permite suministrar al embrión nutrientes como los azúcares de cadenas largas (glucosa) a un tiempo en el que este requerimiento se manifiesta en el embrión (blastocisto) y no antes. Esto reduce el estrés metabólico en el embrión, al ofrecerle, durante las primeras etapas, fuentes energéticas alternativas que reduzcan el estrés metabólico y azúcares más complejos en las últimas etapas de la segmentación preimplantacional.

Tal es lo que reportan, Ghaedrahmati *et al*., (2023), quienes observaron que, al utilizar medios secuenciales como el medio Charles Rosenkrans con aminoácidos (mCR2aa) suplementado con lisado de plaquetas, mejoró las tasas de eclosión de blastocistos. En contraste Garcia-Garcia *et al*. (2007) reportó que embriones cultivados en medio SOF modificado tienen una mayor capacidad de reexpansión post-congelacion, sugiriendo una calidad superior de embriones cultivados en medio SOF en comparación a medio comercial G1+ y G2+ de Vitrolife (Suiza). Los resultados del cultivo de embriones que alcanzaron la etapa de blastocisto de medio SOF reportados (24.1%) fueron similares a los obtenidos en nuestro estudio (25.6%).

Por otro lado, se sabe que el uso de sueros o albúminas como suplementos proteicos en los medios de cultivo de embriones, se asocia a un crecimiento anormal en las crías obtenidas a través de la producción *in vitro* (PIV) de embriones, tales como los bovinos (Farin y Farin, 1995; Behboodi *et al*., 1995; Kruip y den Daas, 1997) y ovinos (Thompson *et al*., 1995; Brown y Radziewic, 1996; Sinclair *et al*., 1997).

En el presente estudio, no se suplementó al SOF secuencial con fuentes proteicas, evitándose el estrés metabólico. Por lo anterior, se propone el uso de SOF secuencial como un medio de cultivo que garantiza el desarrollo de embriones producidos por FIV, hasta la etapa de blastocisto.

CONCLUSIÓN

Se concluye que el desarrollo de blastocistos ovinos fue similar entre los medios utilizados, con la ventaja de que el SOF es un medio conocido simple y económico con lo cual es posible hacer modificaciones o adiciones en la fórmula para evidenciar resultados buscados a diferencia de medios comerciales con patente vigente donde no es posible conocer puntualmente su composición.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana y al CONAHCyT (hoy SECIHTI), por los fondos otorgados para el desarrollo del proyecto de base tecnológica en proceso de maduración, y del proyecto de ciencia básica y de frontera C-459/2024, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Aghaz, H. Hajarian y H. KaramiShabankareh (2016). In vitro culture medium (IVC) supplementation with sericin improves developmental competence of ovine zygotes. *Reproductive Biology*, *16*(1), 87-90.
2. E. Behboodi, Anderson, G. B., BonDurant, R. H., Cargill, S. L., Kreuscher, B. R., Medrano, J. F., Y J.D. Murray (1995). Birth of large calves that developed from in vitro-derived bovine embryos. *Theriogenology*, *44*(2), 227-232.
3. B.W. Brown y T. Radziewic (1996). In vitro production of sheep embryos and growth rates of resultant lambs. En: *Proceedings of the International Congress on Animal Reproduction, Sydney* (Vol. 3, pp. P22-16).

4. C.P. Carolan, A. Lonergan, A. Van Langendonckt y P. Mermillod (1995). Factors affecting bovine embryo development in synthetic oviduct fluid following oocyte maturation and fertilization in vitro. *Theriogenology*, *43*(6), 1115-1128.

5. E. Chronopoulou y J. C Harper (2015). IVF culture media: past, present and future. *Human Reproduction Update*, *21*(1), 39-55.
6. M. Del Collado, N.Z. Saraiva, F.L. Lopes, R.C. Gaspar, L.C. Padilha, R.R. Costa y J.M. García (2016). Influence of bovine serum albumin and fetal bovine serum supplementation during in vitro maturation on lipid and mitochondrial behaviour in oocytes and lipid accumulation in bovine embryos. *Reproduction, Fertility and Development*, *28*(11), 1721-1732.
7. L.J. Edwards, P.A. Batt, F. Gandolfi y D.K. Gardner (1997). Modifications made to culture medium by bovine oviduct epithelial cells: changes to carbohydrates stimulate bovine embryo development. *Molecular Reproduction and Development: Incorporating Gamete Research*, *46*(2), 146-154.
8. L. Falchi, S. Ledda y M.T. Zedda (2022). Embryo biotechnologies in sheep: Achievements and new improvements. *Reproduction in Domestic Animals*, *57*, 22-33.
9. P.W. Farin y C.E. Farin (1995). Transfer of bovine embryos produced in vivo or in vitro: survival and fetal development. *Biology of Reproduction*, *52*(3), 676-682.
10. Y. Filipiak, C. Larocca, C. y M. Martínez (2017) Comportamiento del Semen Bovino Sexado Congelado-Descongelado en Fertilización in vitro (FIV) Capacitado Mediante BO en dos Concentraciones versus Percoll. *Internal Journal of Morphology* 35(4):1337-1341.
11. R.M. García-García, F. Ward, S. Fair, C.M. O'meara, M. Wade, P. Duffy y P. Lonergan (2007). Development and quality of sheep embryos cultured in commercial G1. 3/G2. 3 sequential media. *Animal Reproduction Science*, *98*(3-4), 233-240.
12. A. Ghaedrahmati, M. Mamouei y M. Zandi (2023). Comparison of Single-step and Sequential Embryo Culture Systems: Replacement of Serum with Platelet Lysate. *Gene, Cell and Tissue*, *11*(1).
13. A.K. Goldkamp, Y. Li, R.M. Rivera y D.E. Hagen (2022a). Characterization of tRNA expression profiles in large offspring syndrome. *BMC Genomics*, *23*(1), 273.
14. A.K. Goldkamp, Y. Li, R.M. Rivera y D.E. Hagen (2022b). Differentially expressed tRNA-derived fragments in bovine fetuses with assisted reproduction induced congenital overgrowth syndrome. *Frontiers in Genetics*, *13*, 1055343.
15. T.A. Kruip y J.H.G. Den Daas (1997). In vitro produced and cloned embryos: effects on pregnancy, parturition and offspring. *Theriogenology*, *47*(1), 43-52.
16. Y. Li, D.E. Hagen, T. Ji, M.R. Bakhtiarizadeh, W.M. Frederic, E.M. Traxler y R.M. Rivera (2019). Altered microRNA expression profiles in large offspring syndrome and Beckwith-Wiedemann syndrome. *Epigenetics*, *14*(9), 850-876.
17. J.L. Martínez-Ibarra, E.A. Espinoza-Mendoza, R. Rangel-Santos, D.A. Ambriz-Garcia, y M.C. Navarro-Maldonado (2018). Effect of resveratrol on the in vitro maturation of ovine (Ovis aries) oocytes and the subsequent development of handmade cloned embryos. *Veterinaria México OA*, *5*(4), 10-20.
18. H. Nava-Trujillo, y R.M. Rivera (2023). Large offspring syndrome in ruminants: current status and prediction during pregnancy. *Animals*, *17*, 100740.
19. P. Ramos-Ibeas, L. González-Brusi, M.T. Used, M.J. Cocero, P. Marigorta, R. Alberio, y P. Bermejo-Álvarez (2022). In vitro culture of ovine embryos up to early gastrulating stages. *Development*, *149*(6), dev199743.
20. K.D. Sinclair (1997). Culture of sheep zygotes can alter fetal growth and development. *Theriogenology*, *47*, 380.
21. K.D. Sinclair, T.G. McEvoy, E.K. Maxfield, C.A. Maltin, L.E. Young, I. Wilmut, y J. Robinson, (1999). Aberrant fetal growth and development after in vitro culture of sheep zygotes. *Reproduction*, *116*(1), 177-186.

22. J.E. Swain, (2019). Controversies in ART: considerations and risks for uninterrupted embryo culture. *Reproductive BioMedicine Online*, *39*(1), 19-26.
23. J.G. Thompson, D.K. Gardner, P. Anne Pugh, W.H. McMillan y H. Robin Tervit (1995). Lamb birth weight is affected by culture system utilized during in vitro pre-elongation development of ovine embryos. *Biology of Reproduction*, *53*(6), 1385-1391.
24. S.K. Walker, J.L. Hill, D.O. Kleemann y C.D. Nancarrow (1996). Development of ovine embryos in synthetic oviductal fluid containing amino acids at oviductal fluid concentrations. *Biology of Reproduction*, *55*(3), 703-708.
25. M. Zandi, M., A. Ghaedrahmati y L. Stroebech (2024). The Developmental Competence of the Bovine Embryos Processed in IVC-Stroebech Medium vs. Mcr2aa Medium. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, *14*(1):13-42
26. J. Zhu, A. R. Moawad, C.Y. Wang, H.F. Li, J.Y. Ren, y Y.F. Dai (2018). Advances in in vitro production of sheep embryos. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, *6*, S15-S26.
27. S. Wang, Y. Liu, G.R. Holyoak y T.D. Bunch (1997). The effects of bovine serum albumin and fetal bovine serum on the development of pre-and postcleavage-stage bovine embryos cultured in modified CR2 and M199 media. *Animal Reproduction Science*, *48*(1), 37-45.

BIODIVERSIDAD MICROBIANA Y BIOTECNOLOGÍA: EXPLORANDO EL POTENCIAL DE LA PRESA DE LA PURISIMA

Berenice Noriega Luna[1], Luis Ángel Rodríguez Montelongo[1], Lorena Rodríguez Orduña [2], María Jesús Puy Y Alquiza[1], y Alma Hortensia Serafín Muñoz[1]

[1]Universidad de Guanajuato, [2]Tecnológico de Monterrey
berenice.noriega@ugto.mx

RESUMEN

Este estudio analiza por primera vez la diversidad de metabolitos secundarios en comunidades microbianas de la Presa La Soledad, un ecosistema complejo que ha sido influenciado por su historia minera, las condiciones climáticas semiáridas y su dinámica estacional de humedad y materia orgánica. Estas características han propiciado el desarrollo de comunidades microbianas con funciones ecológicas clave, tales como la degradación de materia orgánica, la biorremediación de metales pesados y la biomineralización. Para conocer la riqueza microbiana en la presa, se tomaron muestras de suelo y se realizó un estudio taxonómico, incluyendo la extracción de ADN genómico mediante un protocolo estándar. Se prepararon bibliotecas de secuenciación Illumina y se secuenciaron los genomas utilizando un secuenciador Illumina NovaSeq X Plus. Los genomas se ensamblaron y anotaron utilizando herramientas bioinformáticas estándar. Se realizaron análisis taxonómicos y filogenómicos utilizando las plataformas MIGA y TYGS. Finalmente, se identificaron y clasificaron clusters de genes involucrados en la biosíntesis de metabolitos secundarios utilizando el software antiSMASH (Antibiotics & Secondary Metabolite Analysis Shell). El análisis taxonómico, realizado en la plataforma MIGA utilizando la identidad de secuencia de genes del ARNr 16S y el análisis de identidad de secuencia de aminoácidos (AAI), permitió la identificación de las cepas bacterianas aisladas del suelo de la Presa La Soledad. La capacidad de estos microorganismos para producir compuestos bioactivos los convierte en candidatos prometedores para aplicaciones industriales y ambientales. Estos hallazgos abren nuevas oportunidades para la biotecnología y la restauración ambiental, especialmente en el contexto de la recuperación de ecosistemas afectados por la minería. En el futuro, se explorará la distribución y dinámica de estas comunidades bacterianas en distintos microhábitats de la presa.

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad microbiana es fundamental para los procesos biogeoquímicos globales y representa una fuente inagotable de recursos biotecnológicos (Jansson & Hofmockel, 2020). Su capacidad para producir enzimas, metabolitos secundarios y otras biomoléculas con aplicaciones en industrias farmacéuticas, agrícolas y alimentarias impulsa la exploración de esta diversidad para el desarrollo de tecnologías sostenibles y la solución de problemas globales como la contaminación y la escasez de recursos. Los ecosistemas acuáticos y sus suelos adyacentes albergan una rica biodiversidad microbiana con funciones ecológicas esenciales, incluyendo la degradación de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y las interacciones interespecíficas (Beltrán-Pineda et al., 2017; Heintz-Buschart et al., 2020; Trivedi et al., 2020; Quiñones-Cerna et al., 2024; Jamal & Ahmad, 2022). La identificación de comunidades bacterianas específicas es crucial para comprender su impacto ecológico y su potencial biotecnológico.

Este estudio se centra en la Presa La Soledad (Santa Ana, Guanajuato, México) (Figura 1), un ecosistema acuático con un alto potencial biotecnológico aún inexplorado. Si bien su función ecológica como reservorio de agua y hábitat es reconocida, la biodiversidad microbiana y el potencial de sus compuestos bioactivos requieren mayor investigación. La proximidad a zonas con actividad minera histórica ha resultado en suelos con concentraciones significativas de metales pesados, materia orgánica y alta humedad (Beltrán-Pineda et al., 2017; Cruz-Hernández et al., 2021), creando un ambiente complejo que podría favorecer el desarrollo de comunidades microbianas únicas con

capacidades metabólicas especializadas en la transformación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Este estudio tiene como objetivo caracterizar la diversidad microbiana de la Presa La Soledad, identificar los géneros bacterianos predominantes y predecir las rutas de biosíntesis de metabolitos secundarios con potencial biotecnológico.

Figura 1. ***Presa de la Soledad***. A) La presa muestras bajos niveles de agua. En la presa se encuentran ruinas de la Ex-Hacienda San Juan Bautista, un sitio histórico relacionado con la actividad minera dentro del área. B) Suelo de la presa con formaciones fluorescentes evidentes y abundantes.

TEORÍA

La composición y función de las comunidades microbianas en ecosistemas acuáticos están influenciadas por una compleja interacción de factores ambientales. La disponibilidad de nutrientes, la humedad del suelo, el pH y la presencia de metales son factores clave que determinan la estructura y la actividad de estas comunidades (Fierer, 2017). En ambientes impactados por la actividad minera, como la Presa La Soledad, estos factores se modifican significativamente, creando condiciones selectivas para microorganismos con capacidades metabólicas especializadas (por ejemplo, resistencia a metales pesados, degradación de compuestos orgánicos). La alta materia orgánica en estos suelos proporciona una fuente de carbono para el crecimiento microbiano, mientras que la humedad influye en la disponibilidad de oxígeno, creando condiciones microaerófilas o anaeróbicas que favorecen el desarrollo de microorganismos específicos (Schimel & Schaeffer, 2012). La presencia de metales, tanto esenciales (Fe, Mn) como pesados, genera gradientes redox que influyen en la composición y la actividad de las comunidades microbianas (Lovley, 2006). Algunos microorganismos pueden utilizar estos metales en sus procesos metabólicos (por ejemplo, las bacterias quimiolitotrofas), mientras que otros desarrollan mecanismos de resistencia a la toxicidad de los metales pesados (Nies, 2003).

La combinación de estos factores puede llevar a la producción de metabolitos secundarios con un alto potencial biotecnológico. Microorganismos de ambientes contaminados pueden poseer mecanismos de biorremediación y producir compuestos con actividad antimicrobiana, antifúngica, o enzimas con aplicaciones industriales (Bertrand et al., 2011). Por lo tanto, se espera que la comunidad microbiana de la Presa La Soledad presente una alta diversidad funcional, incluyendo la capacidad para degradar materia orgánica, transformar metales y producir metabolitos secundarios con actividad biológica. Este estudio se basa en la hipótesis de que la Presa La Soledad alberga comunidades microbianas adaptadas a las condiciones ambientales específicas del sitio, con una alta diversidad metabólica y un significativo potencial para la producción de compuestos bioactivos con aplicaciones biotecnológicas.

PARTE EXPERIMENTAL

a) Muestreo y Caracterización del Suelo

Se recolectaron muestras de suelo superficial en tres puntos diferentes alrededor de la Ex-Hacienda de Beneficio de San Juan Bautista en la Presa La Soledad (Guanajuato, México) durante la temporada de sequía. Se tomaron tres réplicas por punto de muestreo siguiendo las normas NOM-230-SSA1-2002. El análisis granulométrico se realizó mediante el método de tamizado, clasificando las muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

b) Aislamiento e Identificación de bacterias

Se realizaron diluciones seriadas decimales de las muestras de suelo en agua destilada estéril y se sembraron en placas de agar nutritivo. Se seleccionaron colonias con morfologías distintas para su posterior análisis. La extracción de ADN genómico se realizó mediante un protocolo estándar de lisis celular. La secuenciación del gen 16S rRNA se realizó utilizando un secuenciador Illumina NovaSeq X Plus. La identificación taxonómica y el análisis filogenómico se realizaron utilizando las plataformas MIGA y TYGS. El software antiSMASH se empleó para la predicción de genes de biosíntesis de metabolitos secundarios.

RESULTADOS

a) Análisis del Suelo

El análisis granulométrico del suelo de la Presa La Soledad reveló una textura franco-arenosa. La proporción de arena, limo y arcilla fue de aproximadamente 40%, 30% y 30%, respectivamente. Esta textura, junto con la alta humedad observada (61.58%), indica un suelo con alta capacidad de retención de agua y baja permeabilidad. Estas condiciones pueden favorecer el desarrollo de comunidades microbianas específicas adaptadas a ambientes húmedos y con baja aireación. El análisis geoquímico por XRF mostró la presencia de silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), y manganeso (Mn) como elementos químicos más abundantes. Se observaron concentraciones significativas de óxidos de hierro y manganeso, indicando un ambiente redox activo. La presencia de metales pesados en concentraciones moderadas podría influir en la composición y diversidad de la comunidad microbiana. El análisis mineralógico por XRD identificó la presencia de cuarzo, feldespatos y arcillas como minerales más abundantes. La presencia de minerales de arcilla sugiere una alta capacidad de retención de agua y nutrientes. La mineralogía del suelo, en conjunto con las características geoquímicas, podría influir en la diversidad y actividad de la comunidad microbiana.

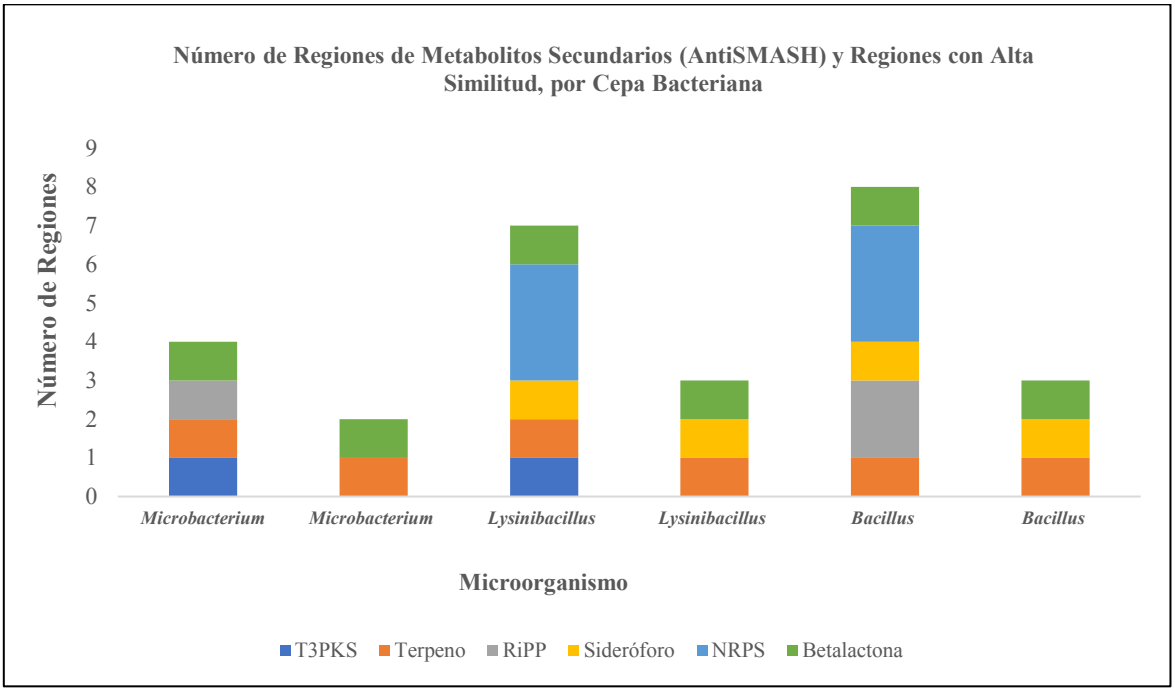
b) Análisis Microbiológico

Con el análisis de la comunidad microbiana del suelo de la Presa La Soledad, basado en la secuenciación del gen 16S rRNA, se identificaron un total de ~100-200 OTUs. Los análisis filogenéticos mostraron una afiliación a tres géneros bacterianos ampliamente distribuidos en ambientes terrestres. La diversidad alfa, medida por el índice de Shannon, presentó valores promedio de ~1.5-2.5 con una desviación estándar de ~0.5-1.0. Los valores más altos se observaron en el punto de muestreo con mayor materia orgánica, mientras que los valores más bajos se registraron en el punto de muestreo con menor materia orgánica. Este patrón sugiere una variación en la diversidad microbiana en función de la ubicación geográfica dentro del área de estudio. Este resultado sugiere una influencia de las características fisicoquímicas del suelo en la estructura de la comunidad microbiana. El análisis funcional de la comunidad microbiana indicó una alta abundancia de genes relacionados con la degradación de materia orgánica, ciclo del nitrógeno, y resistencia a metales.

c) Análisis de metabolitos secundarios

El análisis antiSMASH predijo la presencia de diversas rutas biosintéticas para metabolitos secundarios en los aislados bacterianos. Se identificaron *clusters* de genes asociados con la producción de polipéptidos ribosomales modificados (RiPPs), terpenos, péptidos no ribosomales (NRPs), policétidos, sideróforos y betalactonas (Gráfica 1). *Lysinibacillus* mostró la mayor abundancia de regiones predichas para NRPS (péptidos no ribosomales), indicando un alto potencial para la producción de estos compuestos con amplia gama de actividades biológicas (antimicrobiana, antifúngica e inmunomoduladora) y aplicaciones biotecnológicas. *Bacillus*, por otro lado, presentó una distribución más equitativa de regiones predichas entre los diferentes tipos de metabolitos,

incluyendo una cantidad significativa de policétidos con posibles aplicaciones biomédicas o biotecnológicas. *Microbacterium* mostró una menor abundancia de regiones predichas en general. La presencia de terpenos, con funciones en pigmentación y señalización, y sideróforos, esenciales para la adquisición de hierro, sugiere un rol en las interacciones con otros organismos y la competencia por recursos. La diversidad de rutas biosintéticas predichas indica un significativo potencial biotecnológico, requiriendo estudios futuros para la caracterización y evaluación de la actividad biológica de estos metabolitos.



Gráfica 1. Número de regiones de metabolitos secundarios predichas por antiSMASH y regiones con alta similitud, por cepa bacteriana. Se muestran las regiones predichas para cada tipo de metabolito secundario (T3PKS, Terpeno, RiPP, Sideróforo, NRPS, Betalactona) en cada uno de los géneros bacterianos analizados (*Microbacterium*, *Lysinibacillus*, *Bacillus*).

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona la primera caracterización de la diversidad microbiana y el potencial biotecnológico de la Presa La Soledad, un ecosistema acuático influenciado por la actividad minera histórica. Los resultados revelan una comunidad microbiana con una diversidad moderada, según lo indica el índice de Shannon, y una alta abundancia de genes relacionados con la degradación de materia orgánica, el ciclo del nitrógeno y la resistencia a metales. La identificación de tres géneros bacterianos predominantes, junto con la predicción de rutas biosintéticas para una variedad de metabolitos secundarios (RiPPs, terpenos, NRPs, policétidos y sideróforos) mediante el análisis antiSMASH, indica un significativo potencial biotecnológico. Estos hallazgos sugieren que la Presa La Soledad alberga una comunidad microbiana adaptada a las condiciones ambientales únicas del sitio, con capacidades metabólicas especializadas y un potencial para la producción de compuestos bioactivos con aplicaciones en diversas áreas, incluyendo la biorremediación y la biotecnología. Estudios futuros deberían enfocarse en la caracterización de los metabolitos secundarios identificados, la evaluación de su actividad biológica y la exploración de su potencial para aplicaciones específicas. Además, la investigación de la dinámica espacial y temporal de estas comunidades bacterianas en diferentes microhábitats de la presa contribuirá a una comprensión más completa de su ecología y su potencial biotecnológico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beltrán-Pineda, M. E., Rocha Gil, Z. E., Bernal Figueroa, A. A., Pita Morales, L. A. (2017). Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá *Colombia forestal*, *20*(2), 158-170.
2. Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrío-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., Pierrat, J.C., Gégout, J.C. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. (2011). Nature, 19;479(7374):517-20.
3. Cruz-Hernández, M. A., Reyes-Peralta, J., Mendoza-Herrera, A., Rivera, G., Bocanegra-García, V. (2021). Characterization of a Microbacterium sp. strain isolated from soils contaminated with hydrocarbons in the burgos basin, Mexico. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *37*.
4. Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. (2017). Nat Rev Microbiol., 15(10):579-590.
5. Heintz-Buschart, A., Guerra, C., Djukic, I., Cesarz, S., Chatzinotas, A., Patoine, G., Eisenhauer, N. (2020). Microbial diversity-ecosystem function relationships across environmental gradients. *Research Ideas and Outcomes*,*6*, e52217.
6. Jamal, Q. M. S., Ahmad, V. (2022). Lysinibacilli: A biological factories intended for bio-insecticidal, bio-control, and bioremediation activities. *Journal of Fungi*, *8*(12), 1288.
7. Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. Nature Reviews Microbiology, 18(1), 35-46.
8. Lovley, D. R., & Phillips, E. J. P. (1988). Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese. Applied and Environmental Microbiology, 54(6), 1472-1480.
9. Nies, D.H. Efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes. (2003). FEMS Microbiol Rev., 27(2-3):313-39.
10. Quiñones-Cerna, C., Castañeda-Aspajo, A., Tirado-Gutierrez, M., Salirrosas-Fernández, D., Rodríguez-Soto, J. C., Cruz-Monzón, J. A., Esparza-Mantilla, M. (2024). Efficacy of Indigenous Bacteria in the Biodegradation of Hydrocarbons Isolated from Agricultural Soils in Huamachuco, Peru. *Microorganisms*, *12*(9), 1896.
11. Schimel, J. P., Schaeffer SM. Microbial control over carbon cycling in soil. (2012). Front Microbiol., 26;3:348.
12. Trivedi, P., Delgado-Baquerizo, M., Anderson, I. C., Singh, B. K. (2020). Response of soil properties and microbial communities to agriculture: implications for primary productivity and soil health indicators. Frontiers in Microbiology, 11, 181.

EVALUACIÓN DE LA MICROBIOTA DURANTE EL PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ

Mathew Alessandro Angulo Cocoletzi[1], Refugio Armando Tapia Hernández [2], Carolina Ramírez López [1] y Minerva Rosas Morales[1]

1 Instituto Politecnico Nacional Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada CIBA-IPN
2 BUAP Facultad de Ciencias Químicas

RESUMEN

El café es uno de los productos más comercializados a nivel mundial, ocupando el segundo lugar después del petróleo. Una etapa crucial en su producción es el beneficiado húmedo, que influye en el desarrollo, gracias a la microbiota presente durante la fermentación. (Darío X,2017) El objetivo de este proyecto fue cuantificar y aislar poblaciones microbianas de interés durante el beneficiado húmedo del café, se utilizó la variedad Marsellesa en la cosecha enero a marzo de 2024. El trabajo se realizó en el beneficio de la comunidad de Totutla, en la Sierra Nororiental del estado de Puebla. Se implementaron 10 tratamientos experimentales con tiempos de fermentación variables: 144, 120, 105, 105, 52, 84, 36, 72 y 36 horas de fermentación siguiendo un protocolo.

Muestreo

Colecta de muestras de 100 a 150 g cada 5 h hasta las primeras 24 h de fermentación, registrando simultáneamente la temperatura (ºC), ºBx (reflectometría) y humedad relativa (higrómetro digital).

Las muestras se congelaron a -20 °C para su conservación y posterior análisis en laboratorio.

En laboratorio, se determinaron azúcares reductores por DNS para cuantificarlos.

Se realizaron diluciones seriadas para cultivar en medios selectivos MRS (para bacterias) y PDA (para levaduras), incubados durante 48 horas. Finalmente, se cuantificaron las poblaciones microbianas.

Resultados

Los resultados indicaron que los tratamientos 1 a 4 no mostraron diferencia significativa entre sí, pero sí en los tiempos de cosecha. El tratamiento 5 mostró diferencia significativa con respecto a los tratamientos 7 al 9, aunque entre estos últimos no hubo diferencia significativa ni en las horas de fermentación ni en los tiempos de cosecha. El único tratamiento con diferencia significativa fue el 10, en cuanto al conteo de colonias en MRS para bacterias ácido-lácticas.

En el caso de las levaduras cultivadas en medio PDA, el tratamiento 10 también tuvo diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos. Los tratamientos 1-4 no tuvieron diferencia significativa entre sí, pero sí en los tiempos de cosecha. Los tratamientos 6, 7 y 8 no presentaron diferencia significativa entre sí ni en los tiempos de cosecha.

El análisis de azúcares mediante la técnica DNS reveló que los tratamientos 4, 5, 8, 9 y 10 no tenían diferencia significativa entre sí ni en los tiempos de cosecha. Los tratamientos 6 y 7 tampoco mostraron diferencia significativa entre sí, pero sí en los tiempos de cosecha. Los tratamientos 1, 2 y 3 sí presentaron diferencia significativa

entre sí y en los tiempos de cosecha.

Conclusiones

°Brix: Reducción del 22% en primeros 18 h para tratamientos 1-3 vs estabilidad en 4-10 (12-14°Brix), concordante con degradación enzimática reportada.

Muestras de enero presentaron mayor estabilidad microbiana (±15% variación) vs marzo (±34%), relacionado con madurez homogénea del fruto

Optimización del tiempo: Fermentaciones >72 h (tratamiento 10) con predominio de BAL y levaduras clave en la producción de ácidos orgánicos y precursores aromáticos justificando extender procesos más allá de las 18 h tradicionales.

Control de parámetros: La estabilidad en °Brix (12-14) y temperaturas 22-26°C maximiza la actividad enzimática microbiana, reduciendo coliformes mediante acidificación natural.

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas no alcohólicas más consumidas en el mundo, ocupa el segundo lugar en términos de comercio mundial, justo después del petróleo, lo que resalta su importancia cultural y económica solo superada por el agua potable, es una de las materias primas más intercambiadas globalmente (ITC,2011). Existen dos especies principales de café: *Coffea arábica* y *Coffea canephora* (robusta), que difieren notablemente en sus características morfológicas y genéticas. *Coffea arábica* tiene 44 cromosomas y puede alcanzar alturas de 6 a 8 metros, mientras que *Coffea canephora* tiene 22 cromosomas y crece entre 8 y 10 metros.

La variedad de café Marsellesa, desarrollada a partir del cruce de Villa Sarchí y el Híbrido de Timor, destaca por su resistencia a enfermedades como la roya y la antracnosis, así como su adaptabilidad a diferentes tipos de suelo y condiciones de luz. Es una variedad de porte bajo, semi cónico, con buenas ramificaciones y raíces pivotantes, ideal para suelos francos y zonas con alta luz y periodos de sequía. Sus frutos son más grandes que los de la variedad Caturra, y su producción promedio es de 30 quintales por hectárea en altitudes bajas y medias. Aunque no se considera un café de especialidad, está ganando terreno en el mercado de alta calidad. Velmourougane, 2013

El proceso de beneficiado húmedo del café es un paso crucial, ya que esto influye en la calidad final del grano del café. Este proceso incluye la selección, fermentacion y posterior remoción de la pulpa y el mucilago que recubren al grano; en todas las etapas, la microbiota juega un papel fundamental compuesta principalmente por bacterias, levaduras y hongos, que participan activamente en la degradación del mucilago y en la generación de compuestos que afectan el aroma, sabor y cuerpo del café.

La fermentación es un proceso microbiológico en el que predominan géneros bacterianos como *Lactobacillus*, levaduras como *Saccharomyces* y *Candida*, las cuales contribuyen a la produccion de enzimas responsables en la degradación de azucares contenidas en el mucilago. Además, el mucilago posee compuestos polifenolicos con propiedades antimicrobianas ayudando a inhibir el crecimiento de patógeno, favoreciendo la proliferación de microorganismos benéficos.

El monitoreo y evaluación de la microbiota durante la etapa de fermentación permite optimizar las condiciones, mejorando de esta manera las características fisicoquímicas y sensoriales del café. El conocimiento de la microbiota asociado ayuda al desarrollo de prácticas sostenibles y aprovechamiento con potencial uso biotecnológico.

TEORÍA

La interacción microbiana desempeña un papel fundamental en las distintas etapas de fermentacion, lavado y secado. La microbiota asociada a estos procesos actúan como un sistema integrado que determina tanto la calidad sensoria del grano como el éxito del proceso de beneficiado. Esta influencia se debe principalmente a la actividad metabólica de los microorganismos quienes degradan el mucilago -rico en polisacáridos- mediante la acción de enzimas como pectinasas e hidrolasas, generando ácidos orgánicos y diversos compuestos. (Cruz-O'Byrne et al., 2021; Veloso et al., 2020).

Estudios recientes identifican géneros dominantes durante la fermentación como *Lactobacillus, Pichia y Pseudomonas*. Las interacciones de estos influyen directamente en la velocidad y estabilidad del proceso fermentativo.

La diversidad microbiana se correlaciona positivamente con atributos sensoriales en taza; por ejemplo, *Pichia,* la cual produce ésteres frutales, mientras que *Lactobacillus* contribuye con la acidez. Sin embargo, el desarrollo de microbiota no deseada como lo es *Enterobacter,* puede generar defectos en las características organolépticas en taza. De esta manera podemos asociar a que el control de parámetros durante la fermentacion como pH, humedad relativa, temperatura y tiempo de fermentacion ayudan con el desarrollo de microorganismos benéficos, ayudando asi a obtener calidad en taza. (Veloso et al., 2024; Acosta et al., 2021).

PARTE EXPERIMENTAL

1.Cosecha del Café

En la siguiente tabla se muestra los meses del año 2024-2025 durante los cuales se colectaron las muestras

Tabla 1.- Meses de la cosecha de café 2024-2025 muestreo durante enero a marzo

Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Enero	Febrero	Marzo	Abril

2. Métodos

2.1Instalación de los tratamientos

Las cerezas de café de la variedad Marsellesa se obtuvieron de la finca Macuil Puente ubicada en Totutla Pue Mx, secc 1ra Pahuatitán SN, aproximadamente 240 kg de cereza.

Tabla 5 Diseño de tratamientos en campo, considerando las horas de fermentación y el tipo de muestra de café.

Proceso Lavado se fermenta la cereza, posteriormente se despulpa y se lava para remover el mucilago presente y se tiende al sol para su secado. Proceso Honey se despulpa la cereza de café, se fermenta en baba y se tiende para secado. Proceso Natural se fermenta la cereza sin despulpar y posteriormente se tiende al sol para su secado.

T1	T2	T3	T4	T5
Lavado 144 h	Lavado 129 h	Honey 105 h	Natural 105h	Lavado 52 h
T6	**T7**	**T8**	**T9**	**T10**
Lavado 84 h	Honey 36 h	Natural 72 h	Lavado 16 h	Lavado 36 h

2.2 Muestreo

El muestreo de cereza se realizó en intervalos de 5 h con un total de cinco muestras por proceso (5, 10, 15, 20, 24 h) y por cada muestra se tomaron 150 g.

La Temperatura, ºBx y pH se determinaron en los mismos tiempos de toma de muestra, sin embargo, los ºBx, se midieron hasta las

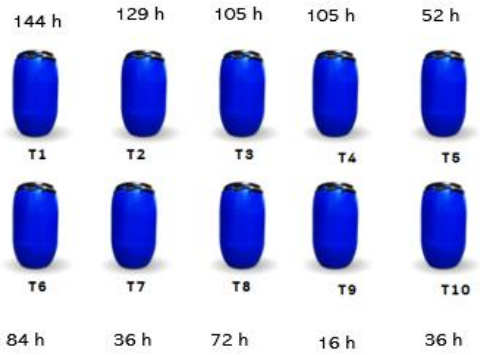


Imagen 1.- Representación de los botes utilizados para la fermentacion en campo de los 10 tratamientos analizados

2.3 Análisis de las muestras en laboratorio

Se tomaron 5 gr de cada una de las muestras, posteriormente se colocaron colocarán en tubos que contenían 9 ml de agua destilada estéril respectivamente. Se realizaron diluciones seriada y posteriormente se tomaron 500 ul de la disolución y se plaquearon plaqueara en medio MRS (para BAL) y PDA (para levaduras) se incubaron durante 48 h a 25 y 30 °C respectivamente. Al terminar las 48 h de incubación, se realizó un conteo en placa, pasando a una selección de colonias mediante morfología en placa, para un aislamiento y posterior conservación en glicerol al 30%.

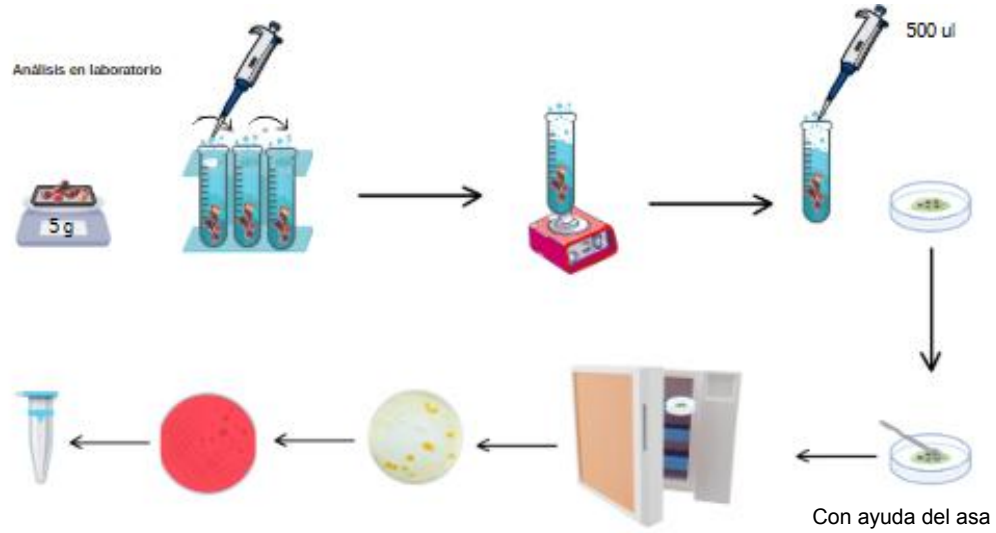


Imagen 2.- Conteo y purificación de las poblaciones microbianas presentes durante la fermentacion de café

RESULTADOS

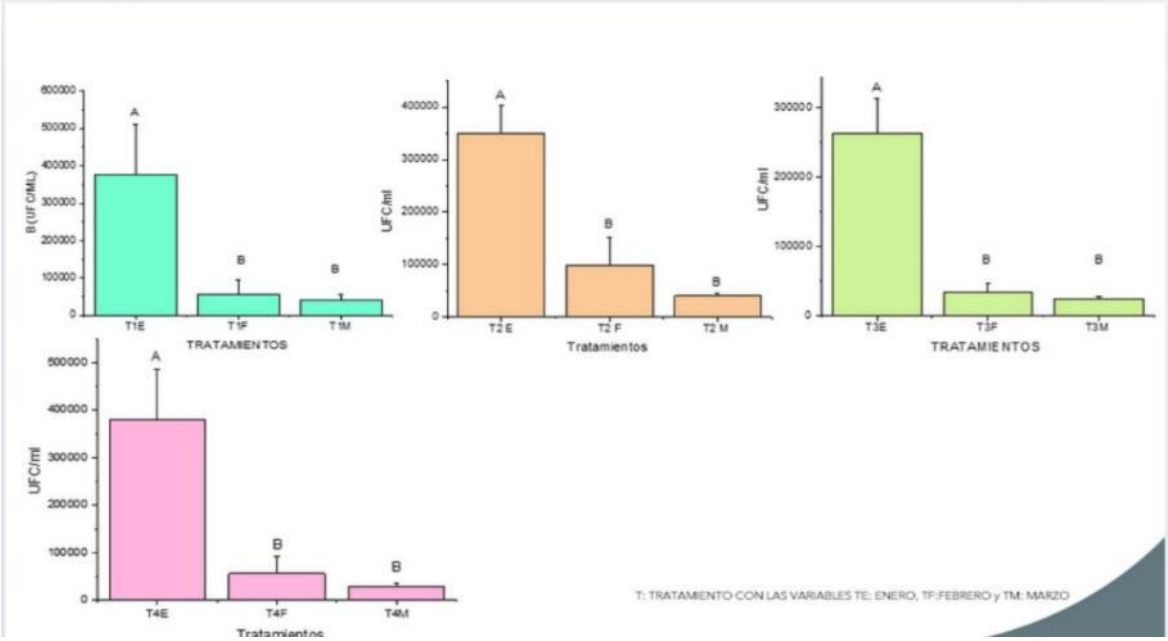


Gráfico 1.- Análisis estadístico de las poblaciones microbianas (BAL) en medio MRS de los tratamientos 1-4

No existe diferencia entre los tratamientos del 1 al 4, pero si en la cosecha de enero con respecto a febrero y marzo en los 4 tratamientos respecto a BAL.

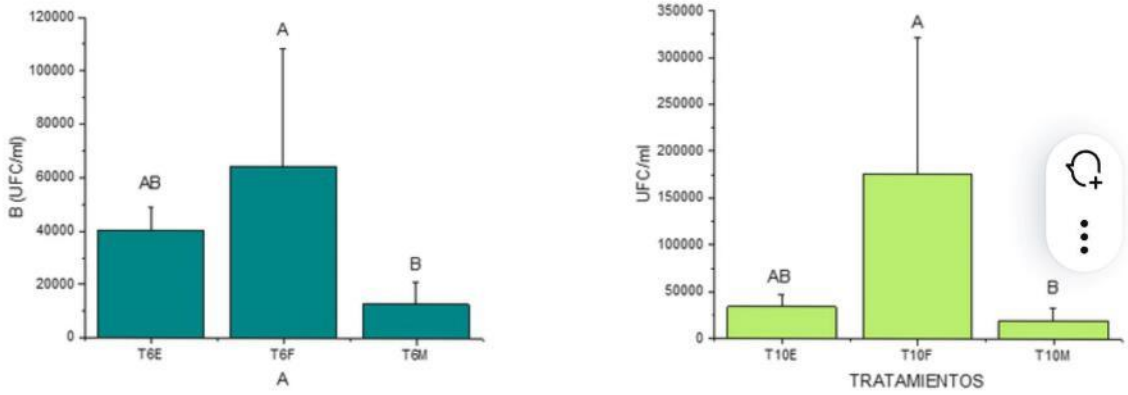


Gráfico 2.- Análisis estadístico de las poblaciones microbianas (BAL) en medio MRS de los tratamientos 1 y 10

No existe diferencia significativa entre las poblaciones microbianas presentes en los tratamientos 6 y 10, pero si entre el mes de Febrero, respecto a Marzo de BAL.

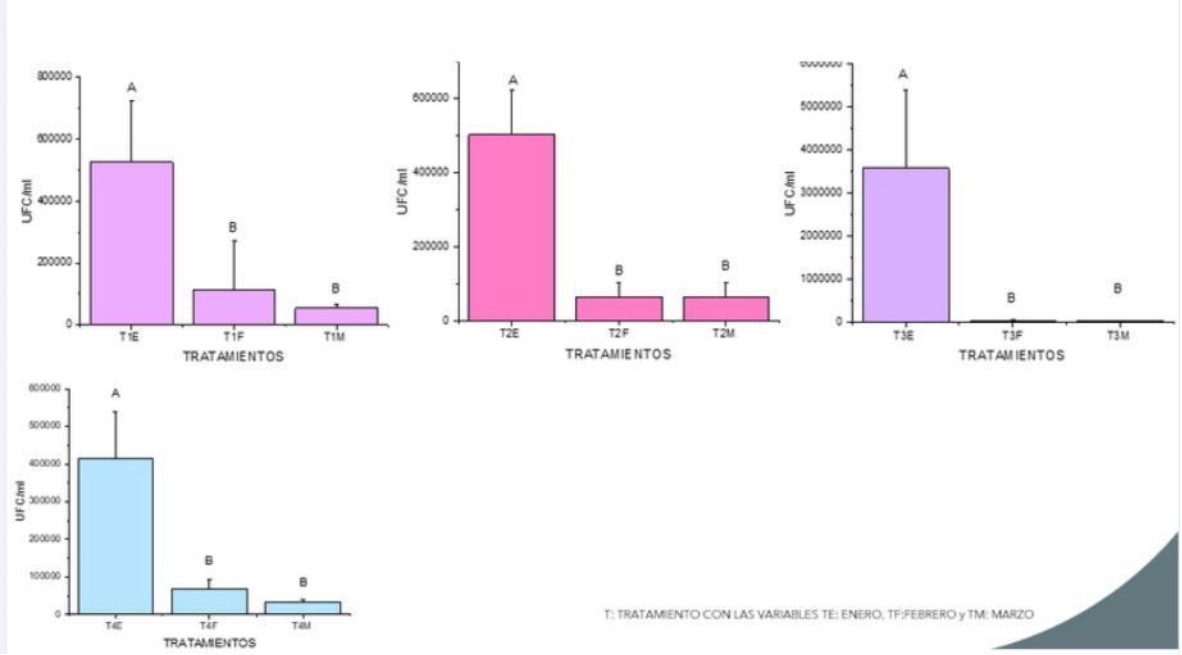


Gráfico 3.- Análisis estadístico de los resultados de levaduras en PDA de los tratamientos 1-4 durante la cosecha 2024

No existe diferencia significativa entre las poblaciones microbianas en medio PDA presentes en los tratamientos 1 al 4, pero si entre enero con respecto a febrero y marzo.

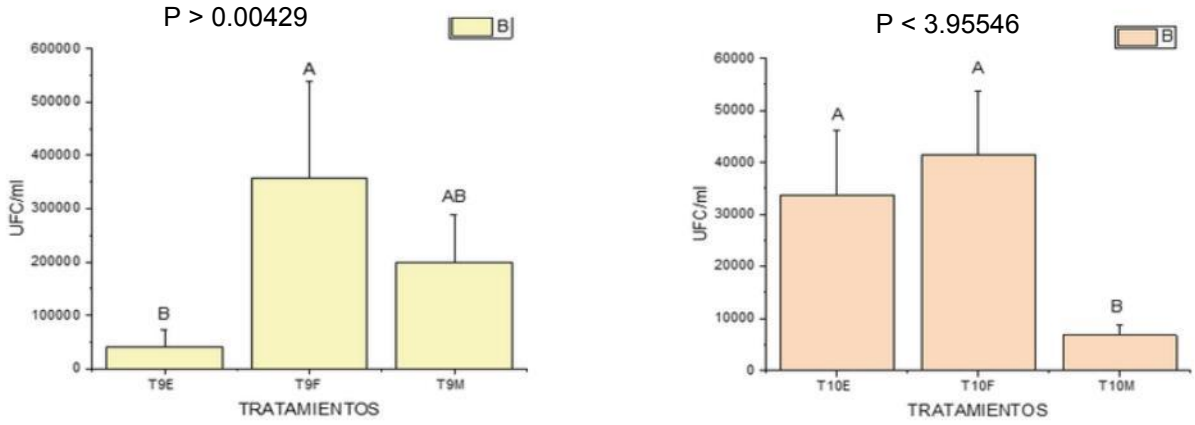


Grafico 4.- Análisis estadístico de los resultados de levaduras en PDA de los tratamientos 9 y 10 durante la cosecha 2024

Existe diferencia significativa en las poblaciones microbianas presentes entre el tratamiento 9 y 10 en el mes de enero y marzo; para el tratamiento 9 solo entre enero y febrero; para el tratamiento 10 solo entre marzo respecto a enero y febrero.

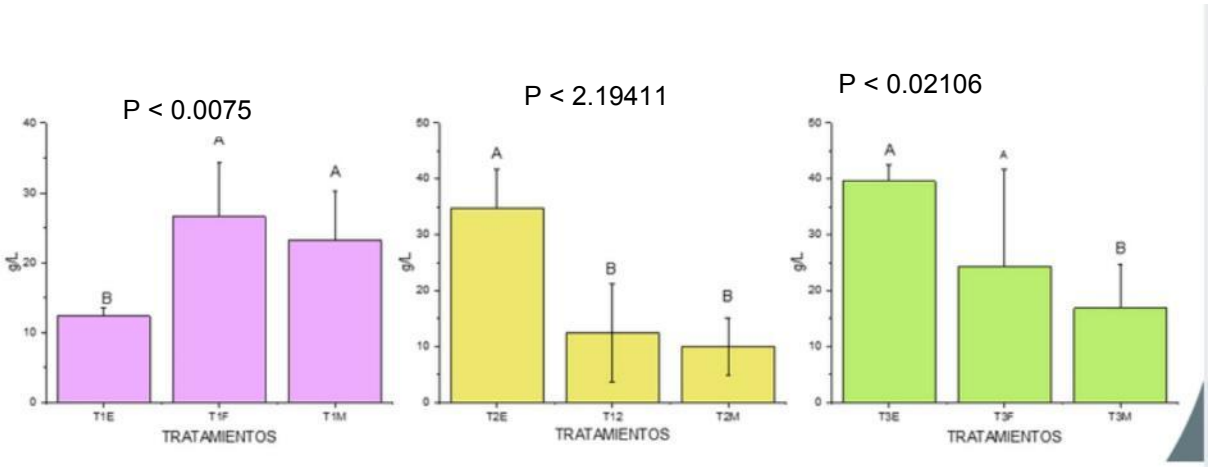


Gráfico 5.- Análisis estadístico de los resultados de azucares presentes de los tratamientos 1-3 durante la cosecha 2024

Existe diferencia significativa entre el contenido de azucares presentes en los tratamientos 1,2 y 3 en el mes de enero y marzo.

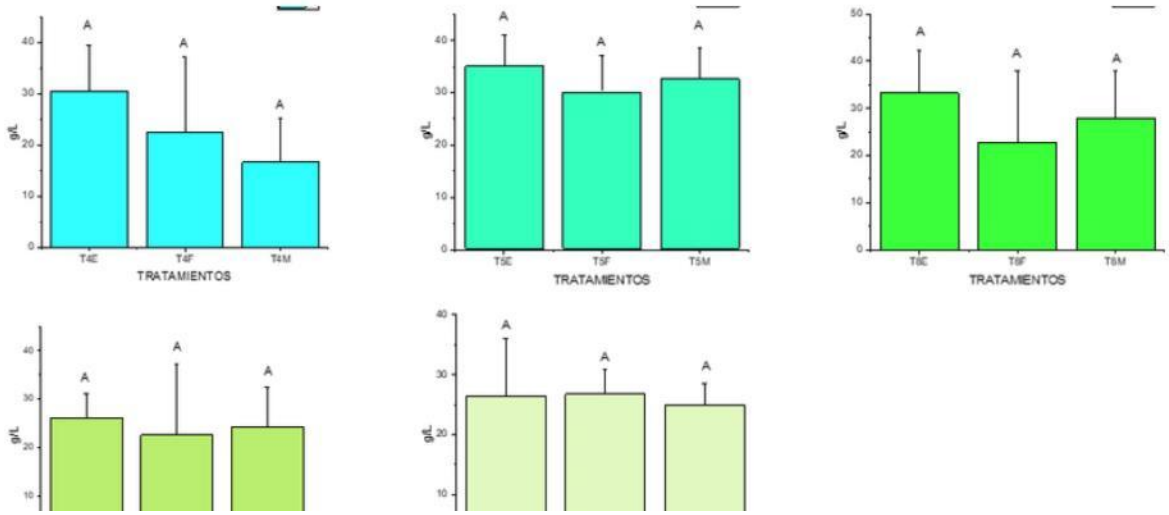


Gráfico 6.- Análisis estadístico de los resultados de azucares presentes de los tratamientos 4,5,8,9 y 10 durante la cosecha 2024

No existe diferencia entre el contenido de azucares presentes en los tratamientos 4,5,8,9 y 10 ni en el mes de instalación (enero, febrero y marzo).

CONCLUSIÓN

Se observó una reducción del 22% en contenido de azúcares totales durante las primeras 18 horas en los tratamientos 1-3, seguida de la estabilidad en los tratamientos 4-10. Las muestras de enero mostraron mayor población microbiana en comparación con marzo. Fermentaciones superiores a 72 horas (tratamiento 10) presentaron predominio de bacterias ácido-lácticas y levaduras que producen ácidos orgánicos justificando prolongar el proceso más allá de las 36 horas tradicionales.

REFERENCIAS

Cruz-O'Byrne, M., Sánchez, L., & Martínez, R. (2021). Microbiota y calidad sensorial en el proceso de fermentación del café. Revista Latinoamericana de Ciencia y Tecnología del Café, 15(2), 45-60.

Hernández, J., López, F., & Ramírez, P. (2022). Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café y manejo de subproductos. Revista Ambiental y Desarrollo Sostenible, 10(1), 78-92.

Hernández-Acosta, D., Veloso, A., & Gómez, S. (2021). Diversidad microbiana del suelo y su

influencia en la calidad del café. Revista de Ciencias Agrícolas, 18(3), 112-127.

Melo, A., Silva, R., & Oliveira, T. (2015). Levaduras y bacterias en la fermentación del café: mecanismos y efectos en la calidad. Journal of Food Microbiology, 22(1), 15-29.

Oliveros, M., Ramírez, J., & Castillo, E. (2011). Enzimas microbianas en la degradación del mucílago durante el beneficiado húmedo del café. Revista Colombiana de Biotecnología, 13(2), 89-99.

Veloso, A., Hernández-Acosta, D., & Gómez, S. (2020). Factores ambientales y su efecto en la microbiota durante el beneficiado húmedo del café. Revista de Microbiología Aplicada, 27(3), 205-220.

Veloso, A., Hernández-Acosta, D., & Gómez, S. (2024). El terroir microbiano y su impacto en la calidad sensorial del café. Revista Internacional de Ciencias del Café, 20(1), 50-67.

CLORURO DE LITIO AFECTA LA TASA DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE MAÍZ (Zea Mays L.)

María de la Luz Buendía-Valverde[1], Fernando C. Gómez Merino[2], Libia I. Trejo-Téllez[3], María Guadalupe Peralta-Sánchez[4]

[1-4]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
buendia.luz@colpos.mx

RESUMEN

El litio (Li) es un metal alcalino no esencial en plantas superiores, su alta fuerza de polimerización y radio iónico similar a elementos esenciales como K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}, permite que el Li pueda sustituir estos iones en distintos procesos fisiológicos. Se ha establecido que altas concentraciones de Li en las plantas pueden provocar efectos tóxicos durante el proceso de germinación, alterando la longitud de brotes y raíces. Por lo anterior, se evaluó el efecto del cloruro de litio (LiCl) en la germinación de semillas de maíz del cultivar HS-2 en concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 µM durante 12 d. Se germinaron 10 semillas en una caja Petri con las soluciones de Li, tres repeticiones por tratamiento. Dentro de una cámara de germinación, registrando cada 3 d el número de semillas germinadas, la longitud de radícula y vástago, con los datos obtenidos se calcularon las tasas de germinación: coeficiente de velocidad de germinación (CVG), velocidad media de germinación (VMG), porcentaje de germinación total (PGT), porcentaje relativo de germinación (PRG), crecimiento relativo de radícula (CRR), índice de germinación (IG) e índice de vigor (IV). Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$). Los resultados muestran que el LiCl causa disminuciones significativas en CVG de 34.67% con 25 µM LiCl; en la VMG de 67, 50 y 51% aplicando 25, 75 y 100 µM LiCl, respectivamente; y de 65.43% en el CRR con 75 µM LiCl. El LiCl no tuvo efectos en el PGT, PGR, IG e IV. Las alteraciones en la tasa de germinación se atribuyen a la disminución del contenido de agua y la turgencia del tejido, además, durante el proceso de germinación, altas concentraciones de Li incrementan la actividad de enzimas antioxidantes, provocando estrés oxidativo. Se concluye que el cloruro de Li altera la tasa de germinación de semillas de maíz tratadas por 12 d.

INTRODUCCIÓN

El Li se encuentra ampliamente distribuido en el planeta, es considerado el oro blanco debido a la importancia económica mundial que ha adquirido en la última década. A nivel mundial, en 2021 se produjeron 100 mil toneladas, 256% más que en el año 2010 y se estima que superará los dos millones de toneladas (Shakoor *et al*., 2023; de Faria *et al*., 2024).

Argentina, Bolivia, Chile, China, Estados Unidos y Australia poseen los mayores recursos de Li, representan el 90% de la cuota mundial. Como contaminante emergente, los desechos que contienen Li crecen cada año y la gestión de riesgos preocupa cada vez más debido a que sus residuos pueden ser fuente potencial de acumulación de Li en el suelo, agua y la cadena alimenticia (Xu *et al*., 2023).

La mayor producción de Li es empleada para la fabricación de baterías de ion Li para dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos; en menores cantidades se usa en la industria cerámica, del vidrio y la metalurgia; en centrales nucleares se utiliza como refrigerante y catalizador de reactores; en medicina se emplea como medicamento estabilizador el estado de ánimo (Kastori *et al*., 2022).

El Li puede desencadenar efectos tóxicos en las plantas, tales como bioacumulación de Li, aumento del estrés oxidativo, daño de biomoléculas y proteínas de membrana, inhibición del crecimiento y disminución de contenido de pigmentos fotosintéticos, además, alteración en el contenido

nutrimental de minerales como el K, Ca, y Mg pueden provocar alteración de la homeostasis, la cual puede conducir a alteraciones en el crecimiento (Leung *et al*., 2024).

Diversos estudios sugieren que pequeñas concentraciones de Li pueden ser benéficas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, además, al ser casi inmóvil en el floema, hace que las hortalizas de hoja verde sean la mayor fuente de Li en la cadena alimenticia (Kastori *et al.*, 2022).

El análisis de la germinación es un parámetro ampliamente utilizado para evaluar los efectos tóxicos de compuestos o sustancias de prueba durante la etapa temprana del desarrollo de plantas. (US EPA, 2012). Por lo anterior, el presente trabajo tiene el objetivo de contribuir a la información de los efectos que produce el Li durante la etapa de germinación y crecimiento temprano de semillas de maíz expuestas por 12 d.

PARTE EXPERIMENTAL

Desinfección de semillas

Se desinfestaron semillas para evitar la presencia de patógenos en solución de hipoclorito de sodio al 2% (0.33 mL L^{-1}) durante 15 min, posteriormente se enjuagaron cinco veces con agua destilada estéril.

Germinación de semillas, tratamientos y diseño experimental

La unidad experimental consistió en una caja Petri con 10 semillas y tres repeticiones por tratamiento. Las cajas se distribuyeron completamente al azar dentro de una cámara de germinación (Thermo Scientific, modelo 310M, EE. UU.) a 32 °C, donde se mantuvieron debidamente hidratadas con la solución de Li correspondiente (**Cuadro 1**) durante 12 d. Se utilizó LiCl (Sigma Aldrich), como fuente de Li.

Cuadro 1. Tratamientos de LiCl en semillas de maíz por 12 d.

Li (μM)				
0	25	50	75	100

Variables evaluadas

Cada 3 d se midió la longitud de radícula y vástago, después de 12 d de exposición, se obtuvieron las tasas de germinación de acuerdo a Buendía-Valverde *et al.* (2024), con las siguientes ecuaciones:

- Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

$$CVG = \frac{Número\ total\ de\ semillas\ germinadas\ por\ caja\ Petri}{A1T1+A2T2+AXTX}$$

- Velocidad media de germinación (VMG)

$$VMG = \sum \frac{Número\ de\ semillas\ germinadas\ cada\ día \times Número\ de\ días\ desde\ el\ inicio\ de\ la\ prueba}{Numero\ total\ de\ semillas\ germinadas\ al\ final\ de\ la\ prueba}$$

- Porcentaje de germinación total (PGT)

$$PGT = \frac{Número\ total\ de\ semillas\ germinadas}{Número\ total\ de\ semillas} \times 100$$

- Porcentaje relativo de germinación (PRG)

$$PRG = \frac{Semillas\ germinadas\ en\ cada\ tratamiento}{Semillas\ germinadas\ en\ el\ tratamiento\ testigo} \times 100$$

- Crecimiento relativo de radícula (CRR)

$$\text{CRR} = \frac{Longitud\ de\ radículas\ en\ semillas\ tratadas}{Longitud\ de\ radículas\ en\ semillas\ testigo} \times 100$$

- Índice de germinación (IG)

$$IG = \frac{(PGR)(CRR)}{100}$$

- Índice de vigor (IV)

$$IV = (\text{Longitud de vástago} + \text{Longitud de raíz})\ x\ Porcentaje\ de\ germinación$$

Análisis de datos

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias con la prueba Tukey ($P \leq 0.05$), usando el software SAS (SAS, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos que produce el LiCl en la germinación son variables. El CVG disminuyó en todos los tratamientos; sin embargo, solo fue significativo en la dosis de 25 μM Li. El VMG disminuyó significativamente en los tratamientos de 25, 75 y 100 μM Li. El CRR disminuyó al aplicar 75 μM de Li. El PGT, PRG, IG e IV, no tienen efectos en la aplicación de Li (Figura 1).

Los efectos de Li en la germinación de semillas son diferenciales, esto sugiere que se dan en respuesta a la concentración empleada (Baran, 2019). Las reducciones a las tasas de germinación encontradas en nuestro estudio se han reportado en especies como el amaranto (*Amaranthus viridis* L.) expuestas de 25 a 100 mg Li kg^{-1} (Gayathri *et al*., 2022), y en semillas de *Brassica cariata* expuesta de 60 a 180 mM LiCl (Li *et al*., 2009).

Contrariamente, a lo encontrado en esta investigación, los tratamientos de 20 a 80 mg LiOH dm^{-3} en semillas de soya (*Glycine max*) tuvieron efectos positivos al incrementar la germinación (Ribeiro *et al*., 2019).

Se desconoce el mecanismo por el cual el Li afecta el desarrollo de las plantas, sin embargo, se ha establecido que interactúa con iones como el Na^+ y K^+, sustituyéndolos en procesos primordiales que afectan el equilibrio hídrico, la apertura y cierre de estomas y síntesis de proteínas, además, tiene efectos en la actividad de enzimas que contienen Mg, por lo que puede alterar procesos como la fotosíntesis (Kastori *et al*., 2022).

La investigación de elementos químicos “nuevos” en el contexto de que están alcanzando su auge muchos años después de haberse descubierto, o bien, su investigación está resurgiendo como es el caso del Li, están mostrando tener cualidades benéficas y no solo tóxicas en las plantas, sin embargo, es necesario continuar estudiando el comportamiento que tiene Li en distintas especies y sobre todo, en la forma en que podamos nutrirnos con cultivos sanos que no representan un problema para nuestra salud (Buendía-Valverde *et al*., 2024).

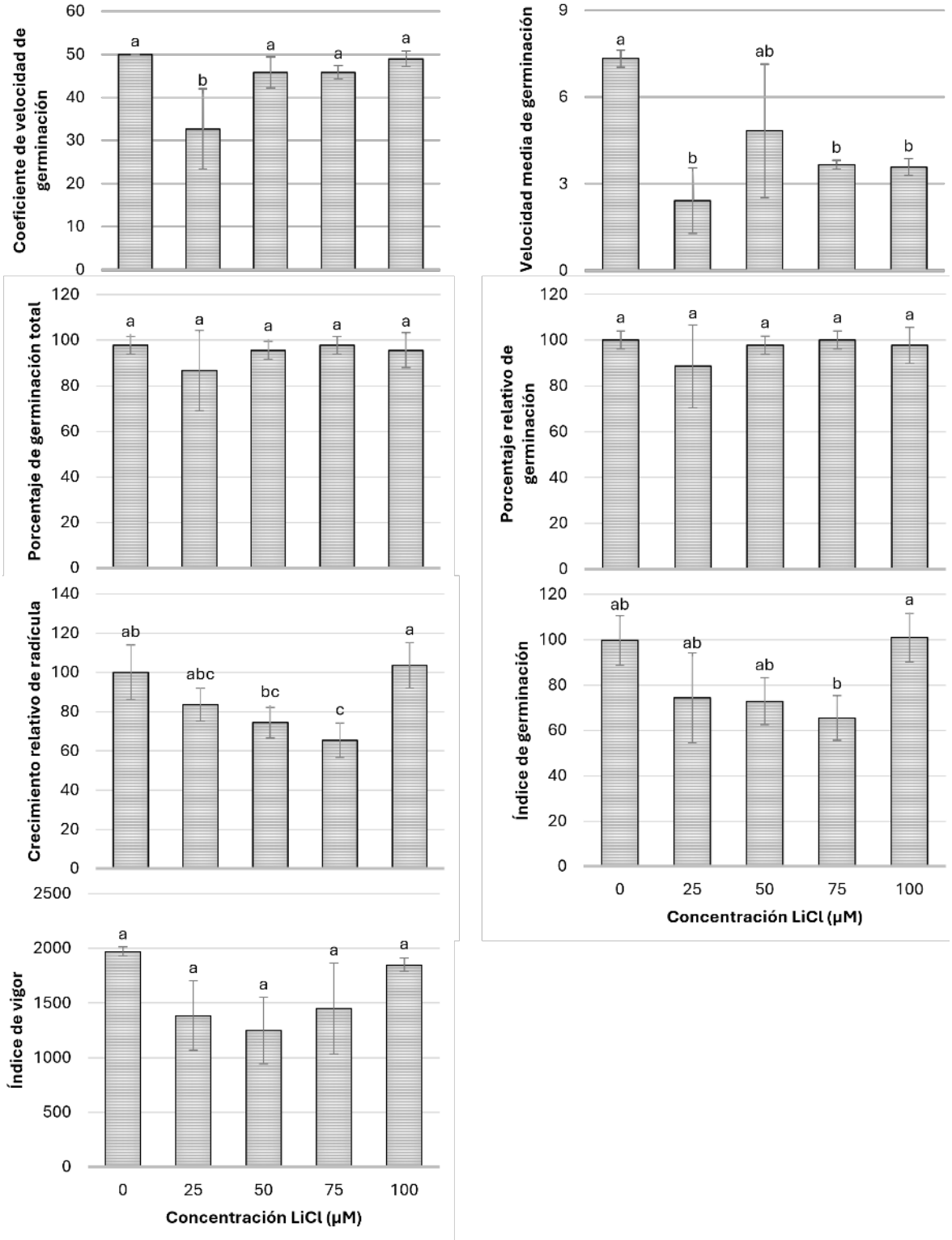


Figura 1. Parámetros de germinación de semillas de maíz cv. HS-2 tratadas con diferentes concentraciones de LiCl. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos Tukey ($P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Los tratamientos con LiCl en los rangos de concentración de 25 a 75 μM ocasionaron reducción en el crecimiento relativo de radícula y en el índice de germinación en maíz cultivar HS-2. De la misma manera, se observó que todas las dosis de LiCl evaluadas redujeron la velocidad media de germinación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Á. J. G. de Faria, N. L. Nascimento, E. J. A. Borghi, G. Do C. Alexandrino, A. F. Machado, T. A. Pereira, H. P. de Oliveira, L. U. Rodrigues, R. R. da Silva, "Foliar-applied lithium and its effect on morpho-physiological behavior and the elemental composition of lettuce", Commun. in Soil Sci. Plant Anal., Vol. 55, 14, 2024, pp. 2059-2072.
2. D. W. M. Leung, P. J. Prendergast, "Physiological Responses of Plants to Environmental Lithium Pollution", In *Lithium and Nickel Contamination in Plants and the Environment*, (World Scientific Series on Advances in Environmental Pollution Management, 2024), pp. 49-62.
3. E. A. Ribeiro, L. P. da Silva, J. H. S. da Luz, H. P. de Oliveira, B. H. N. Nunes, A. J. G. de Faria, G. A. de Freitas, J. P. S. Beserra, S. S. Oliveira, M. de Oliveira, R. R. da Silva, "Germination of soybean seeds treated with sources and doses of lithium for agronomic biofortification", Int. J. Advanced Eng. Res. Sci., Vol. 6, 7, 2019, pp. 670-674.
4. E. J. Baran, "Lithium in plants", In: *Advances in Plant Physiology,* A. Hemantaranjan, (Ed), Scientific Publishers, India, Vol. 18, 2019, pp. 153-162.
5. M. L. Buendía-Valverde, F. C. Gómez-Merino, Y. L. Fernández-Pavía, R. A. Mateos-Nava, L. I. Trejo-Téllez, "Lithium: An element with potential for biostimulation and biofortification approaches in plants", Hortic., Vol. 10, 10, 2024, 1022.
6. N. Gayathri, A. R. Sailesh, N. Srinivas, "Effect of lithium on seed germination and plant growth of *Amaranthus viridis"*, J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci*.,* Vol. 14, 1, 2022, pp. 133-139.
7. N. Shakoor, M. Adeel, I. Azeem, M. A. Ahmad, M. Zain, A. Abbas, M. Hussain, Y. Jiang, P. Zhou, Y. Li, M. Xu, Y, Rui, "Interplay of higher plants with lithium pollution: Global trends, meta-analysis, and perspectives", Chemosphere, Vol. 310, 2023, 136663.
8. R. Kastori, I. Maksimović, M. Putnik-Delić, "Lithium in the environment and its effects on higher plants", Contem. Agric., Vol. 71, 2022, pp. 226-239.
9. SAS Institute Inc, "SAS/STAT Users Guide". Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA. 2011.
10. United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Ecological effects test guidelines. OCSPP 850.4100: Seedling emergence and seedling growth", Office of Chemical Safety and Pollution Prevention (Washington, D. C., 2012), 32p.
11. X. Li, P. Gao, B. Gjetvaj, N. Westcott, M. Y. Gruber, "Analysis of the metabolome and transcriptome of *Brassica carinata* seedlings after lithium chloride exposure", Plant Sci*.,* Vol. 177, 1, 2009, pp. 68-80.
12. Z. Xu, Z. Zhang, S. Peng, Y. Yuan, X. Wang, "Influences of lithium on soil properties and enzyme activities", Chemosphere, Vol. 313, 2023, 137458.

EDITORAS

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
Alexandra Monsetrrat García

ISBN TOMO II
BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ISBN OBRA COMPLETA
AVANCES CIENTÍFICOS Y
TECNOLÓGICOS EN MÉXICO II

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.