

INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN LA TRANSFORMACIÓN DEL MUNDO ACTUAL



COORDINADORES:

Zulema Olguín Jácome
Dionicio Parra Valis
Isabel Lira Vázquez

ISBN: 978-607-5893-91-4



9 786075 893914

COORDINADORES

ZULEMA OLGUÍN JÁCOME, DIONICIO PARRA VALIS, ISABEL LIRA VÁZQUEZ

AUTORES

Adriana Elena Rivera Meza, Alfredo Díaz Criollo, Ana Roselyn Pérez Méndez, Bernardino Avila Martínez, Carmen Sashiel Souza Castellanos, Daniel Utrera López, Dilan Alberto Balderas Utrera, Edgar Alexander Reyes Utrera, Emanuel Pérez López, Emely Rodríguez Rendón, Erick Adrián Juárez Arellano, Erick Palmeros Rodríguez, Esli Isaí Castro Díaz, Feliciano Noemi Silva Ventura, Félix David Murillo Cuevas, Gabriel Paredes de Jesús, Gaudencio Antonio Benito, Guadalupe Pérez Cervantes, Gustavo Pérez Gonzalez, Hazaribagh García Candelaria, Héctor Gabriel Medina Lagunes, Humberto Fregoso Bernabe, Ignacio Garay Peralta, Iliana Valeria Vásquez Hernández, Jacel Adame García, Jazmín Villegas Narváez, Jesús Carillo Ahumada, Jesús Herrera Alarcón, Jonatan López Domínguez, José Alfredo Garcidueñas Paz, José Antonio Fernández Viveros, José Armando Sánchez Salcedo, José Cruz Martínez Vazquez, Juana Fabiola Jiménez Flores, Juana Mora Rojas, Lázaro Gabriel Trujillo Juárez, Litziany Sugahir Perez Hernández, Marco Antonio Díaz Ramos, Marcos Obed Batalla Vallejo, María de Jesús García Gómez, María de los Ángeles Acosta Soberano, María Fernanda Aburto Pérez, Mario Perez Acosta, Massiel Nolasco Vargas, Mercedes Muraira Soto, Monserrat Acosta Cadenas, Oscar Núñez Gaona, Pedro Acosta Alarcón, Ramiro Sánchez Uranga, Roberto Panuncio Mora Solís, Rosario Castro García, Sara Márquez Bueno, Yhara Betzabe Hidalgo Guapillo, Yoana Díaz Castillo.

©RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. 2026



EDITA: RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C.
DUBLÍN 34, FRACCIONAMIENTO MONTE MAGNO
C.P. 91190. XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO.
CEL 2282386072
www.redibai.org
redibai@hotmail.com

ISBN: 978-607-5893-91-4



Sello editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C.
(978-607-5893)
Primera Edición, Xalapa, Veracruz, México.
No. de ejemplares: 2
Presentación en medio electrónico digital
Formato PDF 10 MB
Fecha de aparición 22/07/2026
ISBN 978-607-5893-91-4

DICTAMEN EDITORIAL

La presente obra fue arbitrada y dictaminada en dos procesos; el primero, fue realizado por el **COMITÉ EDITORIAL RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C.** con sede en México; que sometió a los capítulos incluidos en la obra a un proceso de dictaminación a doble ciego para constatar de forma exhaustiva la temática, pertinencia y calidad de los textos en relación a los fines y criterios académicos de la misma, cumpliendo así con la primera etapa del proceso editorial. El segundo proceso de dictaminación estuvo a cargo del **COMITÉ CIENTÍFICO RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C.**; donde se seleccionaron expertos en el tema para la evaluación de los capítulos de la obra y se procedió con el sistema de dictaminación a doble ciego. Cabe señalar que previo al envío a los dictaminadores, todo trabajo fue sometido a una prueba de detección de plagio. Una vez concluido el arbitraje de forma ética y responsable y por acuerdo del Comité Editorial y Científico de la Red Iberoamericana de Academias de Investigación A.C. (REDIBAI), se dictamina que la obra **“INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN LA TRANSFORMACIÓN DEL MUNDO ACTUAL”** cumple con la relevancia y originalidad temática, la contribución teórica y aportación científica, rigurosidad y calidad metodológica, actualidad de las fuentes que emplea, redacción, ortografía y calidad expositiva.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez

Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C.

(978-607-5893)

Dublín 34, Residencial Monte Magno

C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.

Cel 2282386072

CERTIFICACIÓN EDITORIAL

RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI) con sello editorial **No. 978-607-5893** otorgado por la Agencia Mexicana de ISBN, hace constar que el libro **“INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN LA TRANSFORMACIÓN DEL MUNDO ACTUAL”** registrado con el **ISBN 978-607-5893-91-4** fue publicado por nuestro sello editorial con fecha de aparición del 22 de julio de 2026 cumpliendo con todos los requisitos de calidad científica y normalización que exige nuestra política editorial.

Fue evaluado por pares académicos externos y aprobado por nuestro Comité Editorial y Científico.

Todos los soportes concernientes a los procesos editoriales y de evaluación se encuentran bajo el poder Editorial de **RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI)**, los cuales están a disposición de la comunidad académica interna y externa en el momento que se requieran.

La normativa editorial y repositorio se encuentran disponibles en la página **<http://www.redibai-myd.org>**

Doy fe.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez

Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C.
(978-607-5893)

Dublín 34, Residencial Monte Magno

C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.

Cel 2282386072

INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA EN LA TRANSFORMACIÓN DEL MUNDO ACTUAL

Prólogo

Vivimos en una época en la que la innovación y la tecnología han dejado de ser conceptos asociados exclusivamente al progreso científico para convertirse en los principales motores de transformación de la sociedad. Cada avance tecnológico redefine la forma en que trabajamos, aprendemos, nos comunicamos y enfrentamos los desafíos de un mundo cada vez más interconectado y dinámico.

Innovación y Tecnología en la Transformación del Mundo Actual nace con el propósito de ofrecer una visión amplia sobre el impacto de las tecnologías emergentes y la capacidad de la innovación para impulsar el desarrollo económico, social y cultural. Más que un recorrido por los avances tecnológicos, es reflexionar sobre cómo la creatividad, el conocimiento y la adaptación continua se han convertido en elementos esenciales para afrontar los retos del siglo XXI.

En un entorno caracterizado por cambios constantes, la capacidad de innovar representa una ventaja competitiva y, al mismo tiempo, una responsabilidad compartida. La adopción de nuevas tecnologías exige una visión ética, inclusiva y sostenible que permita maximizar sus beneficios mientras se gestionan sus riesgos e implicaciones sociales.

Su objetivo es servir como una fuente de conocimiento, inspiración y reflexión para quienes desean participar activamente en la construcción de un mundo más inteligente, conectado y resiliente.

Es importante cuestionar paradigmas, explorar nuevas ideas y reconocer que la innovación no depende únicamente de los avances tecnológicos, sino también de la capacidad humana para imaginar, crear y transformar la realidad. El futuro no es un destino predeterminado; es una construcción colectiva que comienza con las decisiones que tomamos hoy.

Bienvenido a este recorrido por la innovación y la tecnología, dos fuerzas que continúan transformando el entorno actual y que seguirán definiendo el rumbo de las próximas generaciones.

BIOESTIMULANTES MICROBIANOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS CON BAJOS INSUMOS

Félix David Murillo Cuevas
Jacel Adame García
Adriana Elena Rivera Meza

1

EL MICROBIOMA DEL SUELO: LA CLAVE INVISIBLE PARA COMBATIR LA MARCHITEZ EN LA CAÑA DE AZÚCAR

Jacel Adame García
Feliciano Noemi Silva Ventura
Félix David Murillo Cuevas
José Antonio Fernández Viveros

14

MATERIAL TÉRMICO COMPUESTO POR UNA MATRIZ POLIMÉRICA (POLIESTIRENO EXPANDIDO-EPS) REFORZADA CON PARTÍCULAS CONSOLIDADAS DE CASCARÓN DE HUEVO PULVERIZADO (CAC03)

Ana Roselyn Pérez Méndez
Mario Perez Acosta
Rosario Castro García

28

BIOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS COMO SUSTRATOS EN FERMENTACIÓN BIFÁSICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONIDIOS DE BEAUVERIA BASSIANA

Iliana Valeria Vásquez Hernández
Oscar Núñez Gaona
Erick Adrián Juárez Arellano

41

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DE EXTRACTOS DEL RASTROJO DE AMARANTO

Juana Mora Rojas
María de Jesús García Gómez

49

EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE XILANASAS FÚNGICAS POR FERMENTACIÓN SÓLIDA DE RASTROJO DE AMARANTO

José Alfredo Garcidueñas Paz
Jesús Carillo Ahumada
María de Jesús García Gómez

61

EVALUACIÓN DEL RASTROJO DE AMARANTO COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS PREBIÓTICOS MEDIANTE FERMENTACIÓN SÓLIDA CON *Aspergillus oryzae*

Hazaribagh García Candelaria

Massiel Nolasco Vargas

María De Jesús García Gómez

75

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE EL DESARROLLO VEGETATIVO DEL PASTO CUBA 22 (*Cenchrus purpureus* VC. Om-22)

Jesús Herrera Alarcón

Jonatan López Domínguez

Edgar Alexander Reyes Utrera

Ignacio Garay Peralta

88

MONITOREO DEL PSÍLIDO ASIÁTICO DE LOS CÍTRICOS EN LOS MUNICIPIOS DE PUENTE NACIONAL, PASO DE OVEJAS, LA ANTIGUA Y ÚRSULO GALVÁN, VER.

Alfredo Díaz Criollo

Dilan Alberto Balderas Utrera

Ignacio Garay Peralta

Jesús Herrera Alarcón

95

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS DERIVADOS DE EXCRETAS PECUARIAS PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE VERMICOMPOSTA Y REPRODUCCIÓN DE *Eisenia foetida*

Mercedes Muraira Soto

Emely Rodríguez Rendón

Roberto Panuncio Mora Solís

Emanuel Pérez López

99

HALLAZGOS PARASITOLÓGICOS EN CERDOS PELONES MEXICANOS Y ESTUDIANTES DE UN PROGRAMA UNIVERSITARIO DE CRIANZA

José Armando Sánchez Salcedo

Esli Isaí Castro Díaz

Yhara Betzabe Hidalgo Guapillo

111

RASTROJO DE AMARANTO (*Amaranthus* spp) COMO POSIBLE SUSTRATO ADICIONADO CON TEXTURIZANTE E INDUCTOR EN EL LECHO DE FERMENTACIÓN SÓLIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE *Beauveria bassiana*

Gabriel Paredes de Jesús

María de Jesús García Gómez

Oscar Núñez Gaona

119

ÍNDICE

DESARROLLO DE POPOTES ECOLÓGICOS MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA PIÑA “ECODRINK”

Humberto Fregoso Bernabe

Montserrat Acosta Cadenas

Litziany Sugahir Perez Hernández

Daniel Utrera López 132

132

ANÁLISIS DEL MICROBIOMA DEL RÍO ACTOPAN Y SU RELACIÓN CON LOS IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS DEL USO DEL SUELO

Adriana Elena Rivera Meza

José Antonio Fernández Viveros

Félix David Murillo Cuevas

Jacel Adame García 138

138

EFFECTO FLORAL DEL INJERTO DE CORONA DE TRES CACTÁCEAS EN 2 PORTAINJERTOS EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ

Alfredo Díaz Criollo

Daniel Utrera López

Gustavo Pérez Gonzalez

Juana Fabiola Jiménez Flores

Montserrat Acosta Cadenas

Ramiro Sánchez Uranga 152

152

APROVECHAMIENTO DE SEDIMENTOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN EL DESARROLLO VEGETATIVO

José Antonio Fernández Viveros

Félix David Murillo Cuevas

Jacel Adame García

Adriana Elena Rivera Meza 163

163

EVALUACIÓN DE *Pleurotus djamor* EN DIAS A LA APARICION DE PRIMORDIOS EN 4 MEZCLAS INTERGENERICAS

Juana Fabiola Jiménez Flores

Daniel Utrera López

Ramiro Sánchez Uranga

Montserrat Acosta Cadenas

Pedro Acosta Alarcón 175

175

ÍNDICE

MODELO DE INTERVENCIÓN SOCIAL: CAPACITACIÓN EN CULTIVO DE HONGO COMESTIBLE *Pleurotus ostreatus*. CASO: EL CRUCERO MUNICIPIO DE PUENTE NACIONAL, VER. MÉXICO

Ramiro Sánchez Uranga

Juana Fabiola Jiménez Flores

Daniel Utrera López

Montserrat Acosta Cadenas

Héctor Gabriel Medina Lagunes

185

EVALUACIÓN DEL DESARROLLO MORFOLÓGICO DE TRES GENOTIPOS DE PITAHAHA (*Selenicereus undatus*)

Héctor Gabriel Medina Lagunes

Erick Palmeros Rodríguez

Ramiro Sánchez Uranga

Juana Fabiola Jiménez Flores

Daniel Utrera López

Montserrat Acosta Cadenas

196

BIOESTIMULANTES MICROBIANOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS CON BAJOS INSUMOS

Félix David Murillo Cuevas¹

Jacel Adame García²

Adriana Elena Rivera Meza³

RESUMEN

La producción de hortalizas como jitomate y chile verde se basan en un uso excesivo de fertilizantes y agua, lo que hace en muchos casos insostenible la producción. Una de las alternativas para un manejo sostenible o de bajos insumos en la producción de hortalizas es el uso de bioestimulantes microbianos, los cuales mantienen la calidad de los cultivos con un bajo insumo de fertilización química y agua. En este trabajo se presenta una pequeña revisión teórica del efecto de los bioestimulantes microbianos en cultivos con bajos insumos de fertilización química y agua, así como algunos resultados obtenidos en jitomate y chile en macrotúnel, utilizando un bioestimulante microbiano formulado con bacterias. En jitomate cuando se redujo la fertilización química y agua de riego en un 75%, el bioestimulante logró un incremento en peso de fruto del 27.7% (40.58 g) en comparación a las plantas sin bioestimulante. En chile con una fertilización al 75% el bioestimulante incrementó el peso del fruto en 22.9% (3.15 g) en comparación a los frutos de plantas sin aplicación del bioestimulante. Con el bioestimulante microbiano se puede incrementar el peso y la producción por planta de jitomate y chile verde con un manejo de bajos insumos.

Palabras clave: Jitomate, habanero, *Bacillus subtilis*, *Stenotrophomonas*, *Trichoderma*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento demográfico, la inseguridad alimentaria y la escasa fertilidad de los suelos agrícolas están provocando un uso excesivo de fertilizantes químicos; además, las aplicaciones repetidas y prolongadas de fertilizantes minerales están alterar los agroecosistemas (Bentamra *et al.*, 2023). Sin embargo, por otro lado, se tiene el desafío de que los sistemas agrícolas aumenten su producción para satisfacer la creciente demanda global de alimentos (Reimer *et al.*, 2017), para lo cual los agricultores suelen aumentar el uso de fertilizantes sintéticos a base de nitrógeno. No obstante, el uso excesivo de nitrógeno no siempre corresponde a un aumento del rendimiento; de hecho, a menudo provoca una disminución en la absorción y uso de nitrógeno por parte de la planta, afectando así el

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. felix.mc@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jacel.ag@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. adriana.rm@ugalvan.tecnm.mx

rendimiento y como consecuencia los márgenes de ganancia de los agricultores (Ronga *et al.*, 2019). Además, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados puede tener un impacto perjudicial en el ambiente, debido a la lixiviación de nitrógeno y/o al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El chile y jitomate son hortalizas importantes para la economía y alimentación en nuestro país (Bustamente *et al.*, 2022). Estos cultivos requieren una fertilización química considerable, ya que una deficiencia nutrimental en los cultivos se relaciona con pérdidas significativas (López-Gómez *et al.*, 2020; Díaz-Vázquez, 2023).

En chile habanero, formulaciones de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) con 350-250-360 incrementan el número de frutos por planta, la longitud y diámetro del fruto, así como el rendimiento promedio (41, 259 kg ha⁻¹) (Castillo-Aguilar *et al.*, 2024). En jitomate, la fertilización a base de NPK es importante en la calidad de la producción, morfología, compuestos fenólicos, contenido de flavonoides, licopeno y β -caroteno de frutos de jitomate (Bentamra *et al.*, 2023).

Una estrategia prometedora que puede ayudar al cambio de una agricultura intensiva en nitrógeno a un enfoque más ecológico o biorracional, que disminuya el uso de fertilizantes nitrogenados y al mismo tiempo aumente la eficiencia del uso del nitrógeno y de los rendimientos, es el uso de bioestimulantes microbianos (Shahrajabian *et al.*, 2021; Sánchez-Sánchez *et al.*, 2022; Chafai *et al.*, 2023; Adame-García *et al.*, 2025).

Los bioestimulantes microbianos están formulados con bacterias y hongos benéficos que favorecen el crecimiento y desarrollo de plántulas, plantas y frutos, mediante la estimulación de la solubilización de minerales y fijación de nitrógeno. Además, estimulan procesos fisiológicos y genéticos que promueven la producción de fitohormonas, enzimas y otros compuestos orgánicos (Lephatsi *et al.*, 2021; Vocciante *et al.*, 2022). Asimismo, los microorganismos que se utilizan como bioestimulantes vegetales mejoran la tolerancia al estrés biótico y abiótico, cuando activan genes del sistema de defensa de la planta y producen enzimas, aminoácidos y ácidos orgánicos (Kaushal *et al.*, 2023).

CONTENIDO, MATERIALES Y MÉTODOS

El bioestimulante formulado con hongos micorrízicos arbusculares “Endo root soluble” mejora la altura de planta (68.9 cm), el número de ramas por planta (7.2), el número de flores y frutos por planta y el rendimiento (4.6 kg por planta y una producción estimada de 92 t·ha⁻¹) de jitomate con una dosis reducida del 50% de fósforo. De tal forma que el uso combinado de bioestimulante y fertilización balanceada permite mejorar el crecimiento, rendimiento y calidad del tomate, además de reducir parcialmente el uso de fósforo químico sin afectar la productividad (Anbukkarasi *et al.*, 2018).

Estos resultados sugieren que los bioestimulantes representan una alternativa sostenible para optimizar la producción agrícola y reducir la dependencia de fertilizantes químicos convencionales (Anbukkarasi *et al.*, 2018).

También se ha comprobado el efecto de la acción individual o combinada de bioestimulantes formulados con micorrizas arbusculares y el hongo *Trichoderma* en condiciones de aportaciones óptimas y subóptimas de nitrógeno en el cultivo de jitomate. Por ejemplo, se ha demostrado que la acción de *Rhizoglyphus irregularis* y *Funneliformis mosseae* (ambas micorrizas arbusculares), bajo condiciones de aporte óptimo o subóptimo de nitrógeno, combinadas con la aplicación de *Trichoderma atroviride*, tienen un efecto bioestimulante sinérgico en frutos de jitomate con fertilidad subóptima, revelando concentraciones mejoradas de compuestos carotenoides como β -caroteno (0.647 ± 0.243 mg/100 g), Z-caroteno (0.021 ± 0.021 mg/100 g), 13-z-licopeno (0.145 ± 0.052 mg/100 g) y trans-licopeno (12.586 ± 1.511 mg/100 g), y valores aumentados para el contenido total de fenoles (12.9 ± 2.9 mgGAE/g), en comparación con el control (Ganugi *et al.*, 2023).

La efectividad de bioestimulantes microbianos como bacterias promotoras del crecimiento (PGPB) y hongos micorrízicos arbusculares (AMF) depende de la interacción entre variedad vegetal, fertilización y tolerancia a salinidad, por lo que su aplicación debe ajustarse a cada genotipo (Figura 1). Por ejemplo, en un estudio realizado, la efectividad de bioestimulantes formulados con PGPB y AMF a baja dosis de fertilización (50%) y humedad (75 %), dependió de la variedad de chile en que se aplicaron, interactuando con la fertilización y la tolerancia a la salinidad, beneficiándose la variedad de chile BGV13004, incrementando significativamente el rendimiento y el número de frutos, compensando parcialmente la reducción de fertilización. Por otro lado, se perjudicó la variedad BGV5126 reduciéndose el rendimiento, y con efecto neutro en la variedad Cabañeros, donde el rendimiento total no cambió, aunque aumentó el número de frutos y disminuyó su peso promedio. Lo que indica que el uso de los bioestimulantes microbianos deben adaptarse a las características genéticas y fisiológicas de cada variedad vegetal para optimizar resultados (Sánchez-Sánchez, *et al.*, 2022).

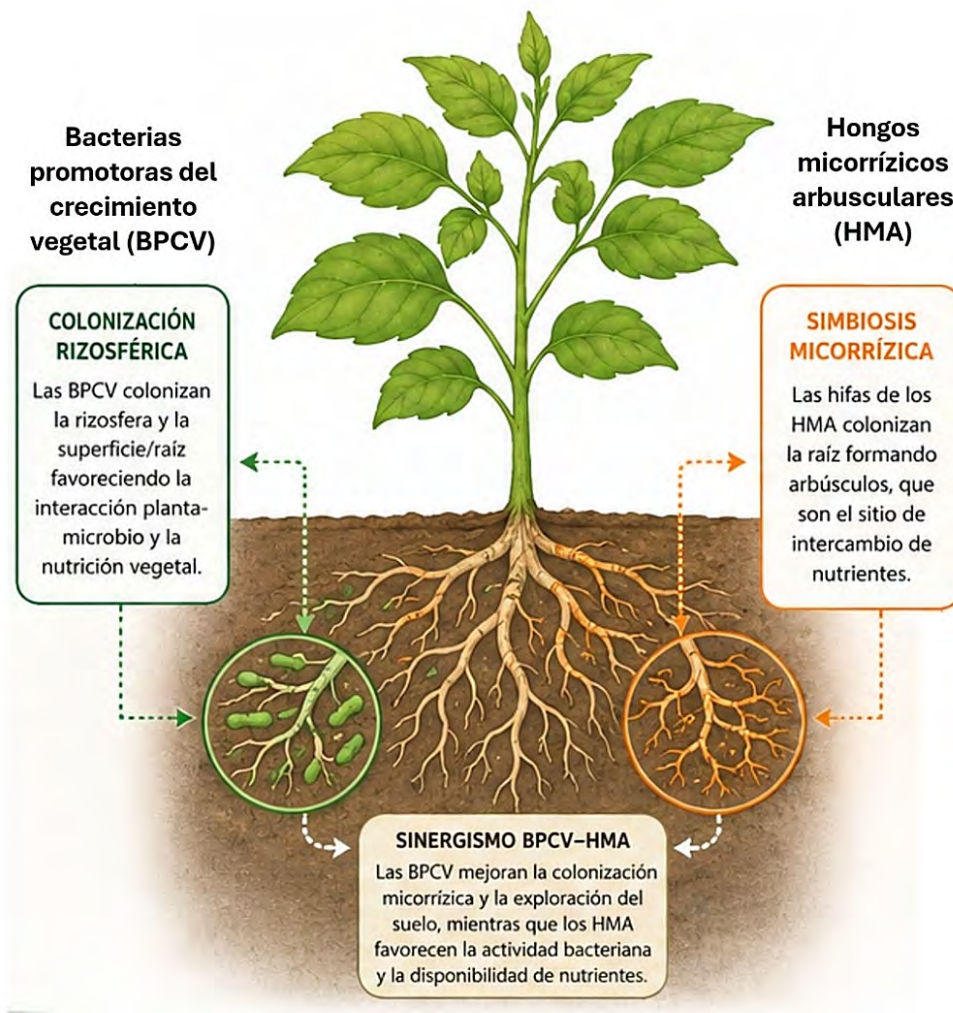


Figura 1. Efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Imagen elaborada con inteligencia artificial.

El efecto bioestimulante bacterias promotoras del crecimiento (PGPB) y hongos micorrízicos arbusculares (AMF), tanto en condiciones óptimas como subóptimas, podría atribuirse a varios mecanismos directos e indirectos, entre ellos: (1) mejor absorción y translocación de nutrientes, incluidos N y P y micronutrientes (Fe, Zn y Mn), (2) aparato radicular más vigoroso (mayor biomasa radicular, área de superficie y número de raíces laterales), especialmente en cultivos que tienen un sistema de raíz pivotante (por ejemplo zanahoria) o un aparato radicular poco profundo (por ejemplo cebolla), (3) mejores relaciones hídricas y capacidad fotosintética, (4) sistema de defensa antioxidante más fuerte, (5) regulación de hormonas vegetales (auxinas, ABA, citoquininas, etileno y giberelinas), (6) promoción de la actividad de los transportadores de nutrientes y (7) producción de enzimas (fosfatasa) y/o excreción de aminoácidos de bajo peso molecular (amino ácidos, azúcares, ácidos orgánicos y fenólicos) y compuestos orgánicos de alto peso molecular (mucílago y proteínas) en la rizosfera (Figura 2) (Rouphael & Colla, 2018).

Los bioestimulantes formulados con bacterias, incluidas las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (*Bacillus*, *Serratia*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Acinetobacter*, *Azospirillum*, *Prestia*, *Rhizobium*, *Streptomyces* y *Stenotrophomonas*), han surgido como insumos agrícolas muy valiosos y económicos para mejorar el rendimiento de las plantas (Ayed *et al.*, 2022; Fadji *et al.*, 2022; Kaushal *et al.*, 2023). Estos bioestimulantes estimulan el crecimiento de las plantas a través de la solubilización de minerales (Zn, P y K), fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas como ácido indol-3-acético (IAA), ácido abscísico (ABA), etileno (ET), citoquinina (CK), ácido jasmónico (JA), metabolitos secundarios (sideróforos, lipopéptidos, ramnolípidos, lipopéptidos cíclicos), enzimas (quitinasas, celulosa, proteasa y glucanasa), compuestos orgánicos volátiles (ácidos grasos y derivados, hidrocarburos, alcanos, alquenos y alquinos), carbohidratos (ácidos, alcoholes, lactonas, aldehídos, bencenoides, etc.), terpenoides, nitrógeno (metaloide, amidas, aminas e iminas), compuestos inorgánicos volátiles (HCN, H₂S, NH₃, CO₂, CO y NO) y lipopolisacáridos (Figura 2) (Lephatsi *et al.*, 2021).

Estos componentes modulan la morfología de las raíces, incluida la biomasa de las raíces, su área de superficie y las raíces laterales recién formadas, la longitud de los brotes, el área de las hojas, la estructura del suelo, además, mejoran la adquisición de nutrientes y minerales (N, P, Fe, Zn, Mn, etc.) y la capacidad fotosintética de la planta. Además, también mejoran la tolerancia al estrés biótico y abiótico al activar los genes responsables del sistema de defensa antioxidante, la producción de fenólicos, enzimas, aminoácidos y ácidos orgánicos (Vocciante *et al.*, 2022).



Figura 2. Mecanismos de acción de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Imagen elaborada con inteligencia artificial.

En el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, el cual está ubicado en las coordenadas 19° 24' 43.64" LN y 96° 21' 32.42" LO, a una altitud de 13 m.s.n.m. y localizado en el municipio de Úrsulo Galván, se llevaron a cabo evaluaciones de un bioestimulante bacteriano. El bioestimulante evaluado fue una mezcla de cepas bacterianas: *Bacillus subtilis* FDMC1, *Stenotrophomonas* sp. JAG2, *B. wiedmannii* JAG3, *Prestia megaterium* JAFV4 y *P. megaterium* AERM5, en los cultivos de jitomate y chile habanero.

El bioestimulante fue aplicado cada mes al suelo dirigido al cuello de la planta (drench), a una dosis del 20 % (v/v) y concentración de 10^6 UFC ml⁻¹ de cada cepa. Además, se aplicó *Trichoderma harzianum* en cuatro de los tratamientos evaluados, en una sola ocasión. Los cultivos se establecieron en un macrotúnel de 3 x 30 m (90 m²), con tapa trasera y doble puerta de seguridad. Se utilizó riego por goteo, acolchado blanco y malla antiáfidos como forro.

Se empleó una fertilización tradicional de 125-100-150 NPK para chile habanero y 160-100-240 NPK para jitomate a dos diferentes porcentajes 100 y 75 %. La fertilización al 75 % se evaluó con y sin bioestimulante y al 100 % sin bioestimulante (testigo). Al mismo tiempo, se evaluaron dos porcentajes de humedad 100 y 75 %, para lo cual se utilizó un medidor de humedad 3 en 1 (Hidrómetro Grow Depot México®). Los tratamientos evaluados fueron: T1= química 100 % + humedad 100 % (FQ100 + H100); T2= química 75 % + humedad 100 % + bioestimulante (FQ75 + H100 + B); T3= química 75 % + humedad 100 % + bioestimulante + Trichoderma (FQ75 + H100 + B + T); T4= química 75 % + humedad 100 % + Trichoderma (FQ75 + H100 + T); T5= química 75 % + humedad 100 % (FQ75 + H100); T6= química 100 % + humedad 75 % (FQ100 + H75); T7= química 75 % + humedad 75 % + bio-estimulante (FQ 75 + H75 + B); T8= química 75 % + humedad 75 % + bio-estimulante + Trichoderma (FQ75 + H75 + B + T); T9= química 75 % + humedad 75 % + Trichoderma (FQ75 + H75 + T); T10= química 75 % + humedad 75 % (FQ75 + H75). Se utilizaron los datos de dos cortes de frutos. Se tomaron como variables de respuesta el peso de fruto, tomado de 20 frutos y producción con el peso total de frutos de 12 plantas para chile habanero y el peso total de 20 frutos para jitomate.

RESULTADOS

De acuerdo con los resultados de la evaluación del bioestimulante, en el cultivo de chile habanero se registraron diferencias significativas entre los promedios de peso de fruto producidos por plantas con y sin aplicaciones del bioestimulante en condiciones de baja fertilización y humedad al 100 % (Figura 3).

Las aplicaciones del bioestimulante con una fertilización al 75 % y humedad del 100 % mantuvieron el peso de los frutos de chile habanero en comparación a los frutos de plantas con el 100 % de fertilización y humedad (Figura 3).

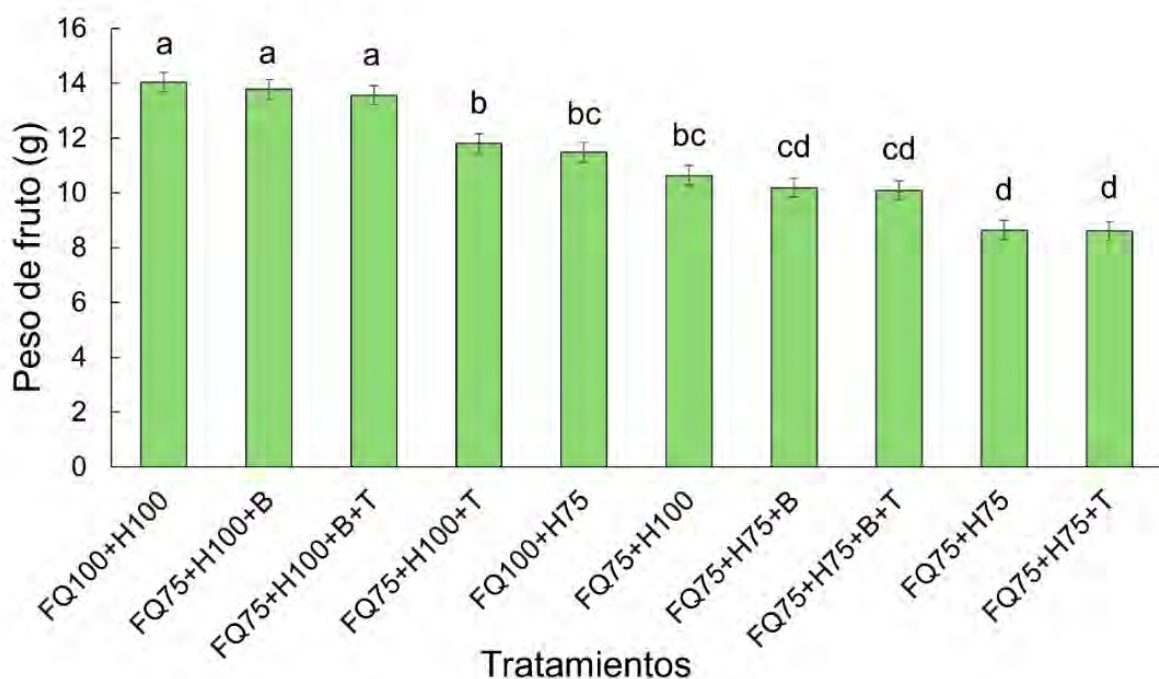


Figura 3. Efecto promedio del bioestimulante microbiano y *Trichoderma* en el peso (g) de frutos de chile habanero producidos en dos cortes con diferentes porcentajes de fertilización química y humedad. FQ= Fertilización química, H= Humedad, B= Bioestimulante, T= *Trichoderma*. Medias con letras en común no presentan diferencias significativas ($p>0.05$). Los valores se presentan en $\square \pm E.E.$

Además, los frutos fueron superiores en tamaño y peso a los frutos obtenidos de las plantas con las mismas condiciones de fertilización y humedad, pero sin la aplicación del bioestimulante (Figura 4). La aplicación del *Trichoderma* sin el bioestimulante no tuvo efectos positivos en los frutos al compararlos con los frutos obtenidos con el 100 % de la fertilización y humedad.

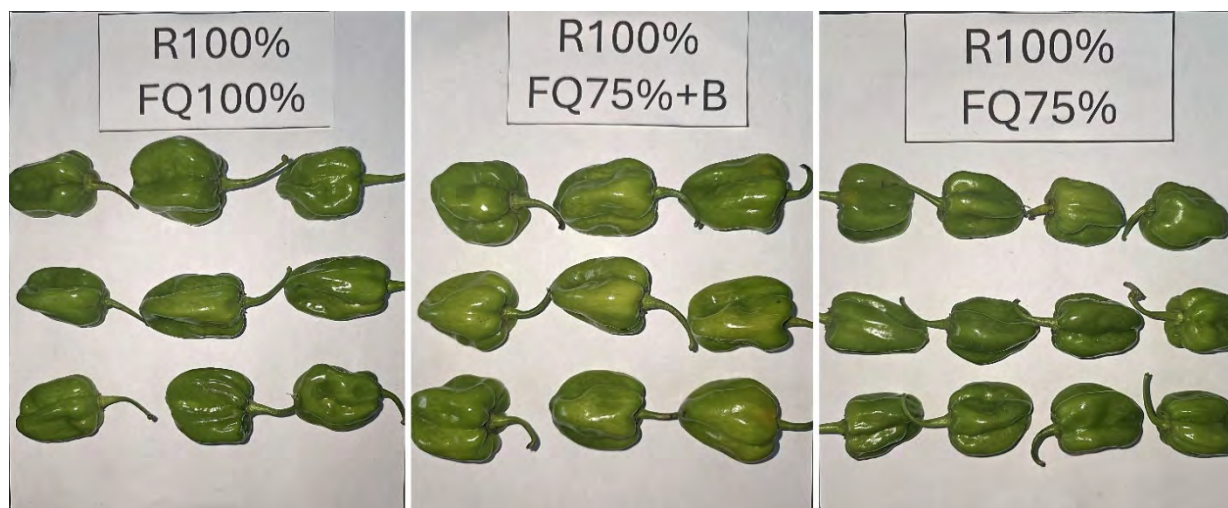


Figura 4. Efecto del bioestimulante bacteriano en frutos de chile habanero producido con un 75 % de fertilización química y 100 % de humedad en condiciones protegidas de macrotúnel. R= Riego (humedad), FQ= Fertilización química, B= Bioestimulante.

En cuanto a la producción de chile habanero en 12 plantas por tratamiento, se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en peso, ya que con las aplicaciones del bioestimulante y *Trichoderma* se mejoraron los rendimientos en condiciones de bajos insumos de fertilización y agua (Figura 5). Se registraron diferencias significativas ($p=0.0001$) entre el peso de los frutos de plantas con y sin bioestimulante sólo o con *Trichoderma* a una fertilización reducida al 75 % y humedad al 100 y 75 % (Figura 5). Con la fertilización reducida, pero humedad al 100 %, el bioestimulante más el *Trichoderma* incrementaron en total el peso de la producción de las 12 plantas en un 37.4 % (1297.7 g) y utilizando sólo el bioestimulante un 43.5 % (1673.5 g).

También se registró un incremento significativo ($p=0.0001$) de en el peso del total de frutos en condiciones reducidas de la humedad y fertilización cuando se aplicó el bioestimulante más la *Trichoderma*, con un incremento del 46.3 % (1571.3 g) en relación con la producción en las mismas condiciones, pero sin bioestimulante y *Trichoderma*.

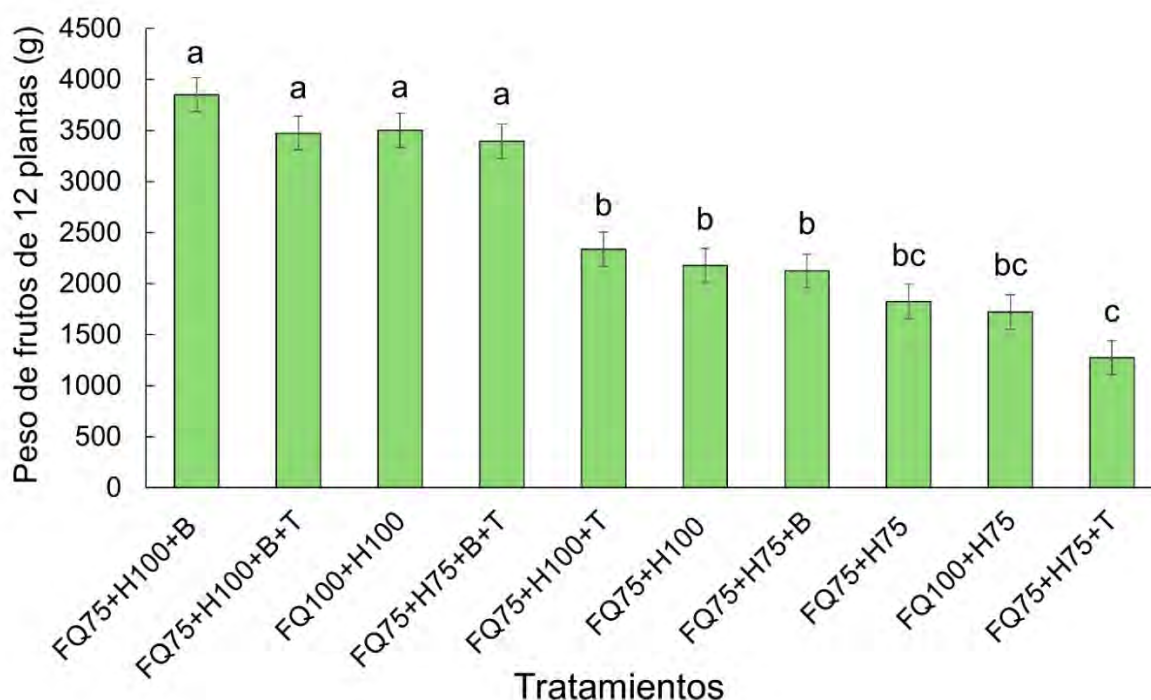


Figura 5. Efecto del bioestimulante microbiano y *Trichoderma* en el peso (g) total de frutos de 12 plantas por tratamiento producidos en dos cortes de frutos con diferentes porcentajes de fertilización química y humedad. FQ= Fertilización química, H= Humedad, B= Bioestimulante, T= *Trichoderma*. Medias con letras en común no presentan diferencias significativas ($p>0.05$). Los valores se presentan en $\bar{x} \pm E.E.$

En el cultivo de jitomate también se registraron diferencias significativas ($p=0.0001$) entre los tratamientos con relación al peso de los frutos (Figura 5). La dosis reducida de fertilización química al 75 % afectó significativamente ($p=0.0001$) el peso de los frutos en las dos condiciones de humedad 75 y 100 % cuando no se realizaron aplicaciones del bioestimulante (Figura 5).

Pero cuando el bioestimulante fue aplicado, las plantas produjeron en promedio frutos de igual peso y tamaño que las plantas con el 100 % de la fertilización química y humedad (Figura 6).

Con las aplicaciones del bioestimulante las plantas mantuvieron el peso de los frutos en relación con los frutos de las plantas con el 100% de la fertilización y 75% de humedad (Figura 5), lo que no ocurrió con la aplicación de sólo *Trichoderma*. La reducción de la humedad afectó significativamente ($p=0.0001$) el peso de la fruta de jitomate en condiciones de 100% de fertilidad (Figura 5), reduciéndose el peso en promedio un 15.3% (23.62 g).

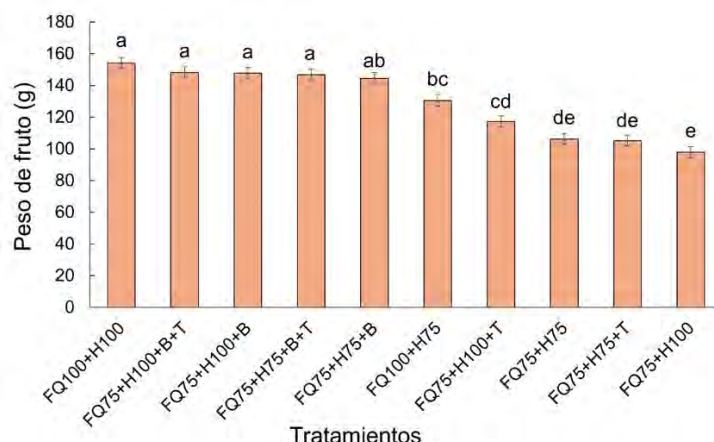


Figura 5. Efecto promedio del bioestimulante microbiano y *Trichoderma* en el peso de frutos de jitomate producido en dos cortes con diferentes porcentajes de fertilización química y humedad. FQ= Fertilización química, H= Humedad, B= Bioestimulante, T= *Trichoderma*. Medias con letras en común no presentan diferencias significativas ($p>0.05$). Los valores se presentan en $\square \pm E.E.$

En promedio, tomando en cuenta los dos cortes de frutos de jitomate, con las aplicaciones del bioestimulante y el *Trichoderma* el peso promedio de frutos de jitomate se incrementó un 27.7% (40.58 g) a una fertilización y humedad del 75 %. A estas mismas condiciones, pero utilizando únicamente el bioestimulante, el peso del fruto se incrementó en promedio un 26.5% (38.31 g).



Figura 6. Efecto del bioestimulante bacteriano en frutos de jitomate producidos con el 75 % de fertilización química y 100 % de humedad. R=Riego (humedad), FQ= Fertilización química, B= Bioestimulante y T= *Trichoderma*.

En cuanto al peso de los 20 frutos de jitomate, todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales excepto el de fertilización química al 75 % con humedad al 75 y 100 % sin bioestimulante, los cuales fueron significativamente inferiores ($p=0.0001$) a todos los tratamientos con bioestimulante y al tratamiento con el 100 % de fertilización y humedad (Figura 7).

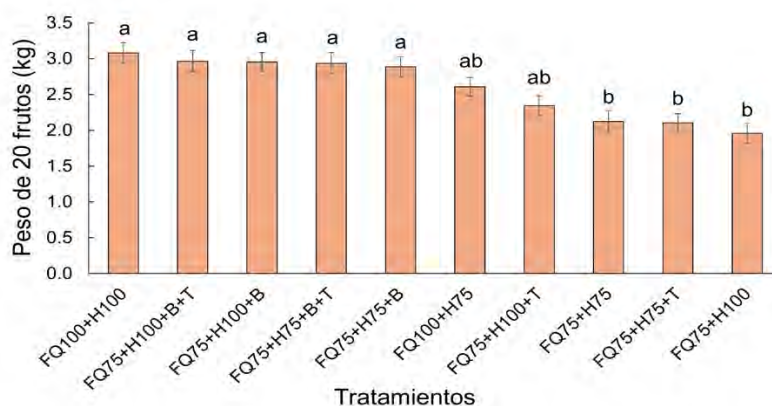


Figura 7. Efecto promedio del bioestimulante microbiano y *Trichoderma* en el peso de 20 frutos de jitomate en dos cortes de fruto producidos con diferentes porcentajes de fertilización química y humedad. FQ= Fertilización química, H= Humedad, B= Bioestimulante, T= Trichoderma. Medias con letras en común no presentan diferencias significativas ($p>0.05$). Los valores se presentan en $\square \pm E.E.$

Se ha comprobado que las cepas que formulan el bioestimulante evaluado tienen las características de estimular respuestas bioquímicas y/o fisiológicas en las plantas de chile habanero y jitomate, lo que mejora el crecimiento y desarrollo de los frutos.

Recientemente se ha reportado que las cepas bacterianas que formulan el bioestimulante evaluado poseen numerosos genes asociados con la estimulación del crecimiento vegetal, por ejemplo, genes asociados con la fijación del nitrógeno, solubilización de hierro, fósforo y potasio; así como genes relacionados con la asimilación y mineralización del azufre (González-Cruz *et al.*, 2025).

Por último, se ha reportado que las bacterias que formulan el bioestimulante evaluado poseen genes que participan en la biosíntesis de sideróforos y terpenos, así como de compuestos antifúngicos y antibióticos como la fengicina, sublancina y surfactina (González-Cruz *et al.*, 2025). Los cuales son metabolitos importantes en el control de enfermedades y en la estimulación directa del crecimiento vegetal.

CONCLUSIONES

Los bajos insumos de fertilización química y humedad afectan significativamente el peso de los frutos de chile habanero y jitomate. No obstante, con las aplicaciones del bioestimulante microbiano, el peso de los frutos es igual al peso de los frutos obtenidos con el 100% de la fertilización química y humedad, manteniéndose la calidad de la fruta.

Con las aplicaciones del bioestimulante microbiano se pueden obtener ahorros del 25% de la fertilización química y del agua, con una producción de frutos de chile habanero y jitomate de calidad, igual a la obtenida con el 100% de fertilización y humedad.

REFERENCIAS

- Adame-García, J., Murillo-Cuevas, F.D., Fernández-Viveros, J.A., Rivera-Meza, A.E. & Cabrera-Mireles, H. (2025). Respuesta del jitomate a dosis reducidas de fertilización mineral con bioestimulante microbiano en macrotúnel. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 16(8), 1-9. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i8.3925>
- Anbukkarasi, V., Prabu, M., Paramaguru, P., Pugalandhi, L., & Jeyakumar, P. (2018). Effect of nutrients and biostimulants on growth, yield and quality of Tomato (*Solanum lycopersicon*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. Special Issue-6, 49-55.
- Ayed, S., Bouhaouel, I., Jebari, H., & Hamada, W. (2022). Use of biostimulants: Towards sustainable approach to enhance durum wheat performances. *Plants*, 11(1), 133. <https://doi.org/10.3390/plants11010133>
- Bentamra, Z., Medjedded, H., Nemmiche, S., Benkhelifa, M. & Santos, D.R. (2023). Effect of NPK Fertilizer on the biochemical response of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Notulae Scientia Biologicae*, 15(3), 11516-11516. <https://doi.org/10.55779/nsb15311516>
- Bustamante, L.T.I., García, G.F., Vargas, C.J.M & León-Andrade, M. (2022). Efectos del comercio internacional en la especialización y competitividad de jitomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) en México (1980-2016). Paradigma económico. *Revista de economía regional y sectorial*, 14(1), 181-206.
- Castillo-Aguilar, C., Ramírez-Luna, E., Wong-Cámara, C.G., Matos-Pech, G., Chiquini-Medina, R.A., Bautista-Parra, S.G. & Palma-Cancino, D.J. (2024). Rendimiento de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) con el uso de diferentes niveles de NPK en Campeche, México. *Revista Bio Ciencia*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1581>
- Chafai, W., Haddioui, K., Serghini-Caid, H., Labazi, H., AlZain, M.N., Noman, O., Parvez, M.K., Addi, M. & Khalid, A. (2023). Impact of Arbuscular mycorrhizal fungal strains isolated from soil on the growth, yield, and fruit quality of tomato plants under different fertilization regimens. *Horticulturae*, 9(9), 1-18. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9090973>
- Díaz-Vázquez, F.A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., García-León, Á. & Sandoval-Rangel, A. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>

- Fadiji, A. E., Babalola, O. O., Santoyo, G., & Perazzolli, M. (2022). The potential role of microbial biostimulants in the amelioration of climate change-associated abiotic stresses on crops. *Frontiers in Microbiology*, 12, 829099. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.829099>
- Ganugi, P., Fiorini, A., Tabaglio, V., Capra, F., Zengin, G., Bonini, P., Caffi, T., Puglisi, E., Trevisan, M. & Lucini, L. (2023). The functional profile and antioxidant capacity of tomato fruits are modulated by the interaction between microbial biostimulants, soil properties, and soil nitrogen status. *Antioxidants*, 12(2), 520. <https://doi.org/10.3390/antiox12020520>
- González-Cruz, C., Flores-Estévez, N., Noa-Carranza, J.C., Zamora-Briseño, J.A., Santillán-Mendoza, R., Ortiz-Castro, R., Estrella-Maldonado, H., Matilde-Hernández, C., Murillo-Cuevas, F.D., Fernández-Viveros, J.A., Adame-García, J. & Flores-de la Rosa, F.R. (2025). Genomic insights into five PGPR strains from tropical soil reveal potential for root architecture modulation and sustainable agriculture. *Rhizosphere*, 35, 101162. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101162>
- Kaushal, P., Ali, N., Saini, S., Pati, P.K. & Pati, A.M. (2023). Physiological and molecular insight of microbial biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1041413>
- Lephatsi, M.M., Meyer, V., Piater, L.A., Dubery, I.A. & Tugizimana, F. (2021). Plant responses to abiotic stresses and rhizobacterial biostimulants: Metabolomics and epigenetics perspectives. *Metabolites*, 11(7), 1-31. <https://doi.org/10.3390/metabo11070457>
- López-Gómez, J.D., Sotelo-Nava, H., Villegas-Torres, O.G. & Andra-de-Rodríguez, M. (2020). Yield and quality of habanero chili in response to driving pruning and nutritional regime. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(2), 315-325. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1777>
- Reimer, A., Doll, J.E., Basso, B., Marquart-Pyatt, S.T., Robertson, G.P., Stuart, D. & Zhao, J. (2017). Moving toward sustainable farming systems: Insights from private and public sector dialogues on nitrogen management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(1), 5A-9A. <https://doi.org/10.2489/jswc.72.1.5A>
- Ronga, D., Parisi, M., Pentangelo, A., Mori, M. & Di Mola, I. (2019). Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. *Agronomy*, 9(12), 855. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in plant science*, 9, 1655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655>

- Sánchez-Sánchez, A., Hernández, V., Hellín, P., Jiménez-Pérez, M., Rodríguez-Burruezo, A., Fenoll, J. & Flores, P. (2022). Impact of low-input management and microbial biostimulants on yields of traditional pepper varieties. *AgroLife Scientific Journal*, 11(1), 196-203. <https://doi.org/10.17930/AGL2022123>
- Shahrajabian, M.H., Chaski, C., Polyzos, N. & Petropoulos, S.A. (2021). Biostimulants application: A low input cropping management tool for sustainable farming of vegetables. *Biomolecules*, 11(5), 1-53. <https://doi.org/10.3390/biom11050698>
- Voccianti, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G. & Franchi, E. (2022). The role of plant growth-promoting rizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Sciences*, 12(3), 1-16. <https://doi.org/10.3390/app12031231>

EL MICROBIOMA DEL SUELO: LA CLAVE INVISIBLE PARA COMBATIR LA MARCHITEZ EN LA CAÑA DE AZÚCAR

Jacel Adame García¹

Feliciano Noemi Silva Ventura²

Félix David Murillo Cuevas³

José Antonio Fernández Viveros⁴

RESUMEN

En la costa central de Veracruz, se concentra una importante superficie agrícola destinada al cultivo de caña de azúcar, ubicándose dos ingenios azucareros de gran importancia, que integra aproximadamente 10,000 abastecedores que producen más de 2 millones de toneladas. Sin embargo, el año pasado (2025) durante el desarrollo del cultivo se presentó una enfermedad atípica, marchitez de las plantas. Esta enfermedad, se ha propagado debido a las condiciones ambientales de la zona que favorecen el desarrollo de patógenos agentes causales de la marchitez, las especies del género *Fusarium* son las que están asociadas con la enfermedad y que generan pérdidas económicas significativas. Se han identificado zonas en las cuales no se presentan síntomas se cree que estos suelos poseen la capacidad natural de suprimirlo. El conocimiento sobre los agentes causales y sobre la microbiota asociada a suelos supresivos es aún limitado. En este documento se explicará cómo identificar y caracterizar molecularmente las comunidades microbianas asociadas a suelos supresivos de la marchitez de la caña de azúcar, mediante análisis comparativo, empleando herramientas de secuenciación de alto rendimiento. Para contribuir al entendimiento de los procesos biológicos involucrados en la supresividad del suelo para el desarrollo de estrategias biológicas y contrarrestar la enfermedad.

Palabras clave: bacterias benéficas, 16S, fitopatógenos, *Fusarium*

INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es de suma importancia para México debido a que contribuye a la economía rural, la generación de empleo y el abastecimiento de un producto básico para el consumo y la industria. El cultivo de caña de azúcar es un eje estratégico para el desarrollo regional y la seguridad productiva. Veracruz destaca como el primer productor de caña de azúcar del país, produce el 40% del total nacional, esto gracias a las condiciones edafoclimáticas

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jacel.ag@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. naomysilvaventura@gmail.com

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. felix.mc@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jose.fv@ugalvan.tecnm.mx

óptimas para el desarrollo del cultivo, en el estado se encuentran en operación 18 ingenios, lo que convierte a la caña de azúcar en un pilar del sector agropecuario estatal y en una fuente fundamental de ingresos para las zonas rurales (SADER, 2024).

Particularmente en los municipios de Úrsulo Galván, La Antigua, Puente Nacional, Actopan y Paso de Ovejas de la zona de influencia del IT de Úrsulo Galván, la caña de azúcar constituye la base económica y productiva de numerosas comunidades, además de formar parte central del paisaje agrícola y la identidad local. Sin embargo, en la actualidad la dependencia histórica del monocultivo y el manejo agronómico intensivo han generado deterioro del suelo y aumentado la incidencia de enfermedades que afectan el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo.

Entre las enfermedades de origen edáfico destaca, la marchitez de la caña de azúcar, la cual comúnmente está asociada a hongos de las especies del género *Fusarium*, que provocan daños significativos en el rendimiento y la calidad de la caña (Agrios, 2005; Leslie y Summerell, 2006). Para controlar esta enfermedad se emplean prácticas agronómicas convencionales (uso de productos químicos) que presentan una eficacia limitada frente a los patógenos del suelo y que además generan impactos negativos sobre la biodiversidad microbiana y la salud del suelo.

Por otra parte, los suelos supresivos se reconocen por poseer una capacidad natural para reducir la incidencia o severidad de las enfermedades, aun en presencia del agente causal y de un hospedero susceptible, esta característica los convierte en sitios de estudio claves para desarrollar estrategias de manejo sustentable. El éxito de esos suelos son las comunidades microbianas que habitan en nichos ecológicos específicos dentro y alrededor de la planta, generando beneficios en los sistemas agrícolas como suprimir las enfermedades, activar las respuestas de defensa en las plantas, inducir la resistencia sistémica, mejorar la tolerancia al estrés abiótico, facilitar la adquisición de nutrientes y contribuir a la estabilidad de la estructura del suelo (Birt et al. 2022).

En los sistemas de producción de caña de azúcar en Veracruz y otras regiones, se ha estudiado la presencia de comunidades microbianas, principalmente en la determinación de variables biológicas indirectas como la respiración o biomasa microbiana del suelo. Por otra parte, para el aislamiento, identificación y caracterización se han empleado métodos tradicionales, pero estos presentan limitaciones importantes. Como, por ejemplo, numerosos microorganismos requieren condiciones muy particulares para su crecimiento y no pueden cultivarse en laboratorio, lo que impide su identificación y provoca que se subestime la abundancia y diversidad microbiana, además de que realizarlo de forma tradicional requiere una inversión considerable de tiempo y recursos lo que dificulta su aplicación a gran escala.

La identidad taxonómica y la organización de las comunidades microbianas varían de acuerdo con la región y sistema agrícola, por lo que su estudio debe realizarse en contextos locales específicos. En este sentido, resulta necesario caracterizar con herramientas moleculares las comunidades microbianas presentes en suelos supresivos y no supresivos, así como comparar su diversidad y estructura.

En este proyecto se pretende identificar y caracterizar molecularmente las comunidades microbianas asociadas a suelos supresivos, mediante un análisis comparativo que contribuya al entendimiento de la relación entre el microbiota del suelo y la reducción de la incidencia o severidad de la marchitez. Con la finalidad de sentar bases científicas y tecnológicas para el futuro desarrollo de estrategias de manejo biológico y sustentable de la enfermedad.

CONTENIDO

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una planta herbácea perenne perteneciente a la familia Poaceae (gramíneas), se caracteriza por poseer tallos robustos, articulados y ricos en sacarosa, el azúcar se extrae para su uso alimentario industrial. Es uno de los cultivos agrícolas de zonas tropicales más importantes a nivel mundial, no solo por la producción de azúcar sino también por la producción de etanol, bebidas alcohólicas, biocombustibles y productos alimentarios.

En México la caña de azúcar es un cultivo de gran tradición e importancia económica. Se considera entre los principales productores del mundo, con una producción anual que supera los 50 millones de toneladas, esta agroindustria contribuye significativamente al PIB agrícola, genera empleo en zonas rurales y moviliza cadenas productivas en varios estados del país (SADER, 2024). Veracruz es el estado líder en producción de caña de azúcar, aporta entre el 35 y 40% de la producción nacional. Esta posición estratégica la hace especialmente relevante para estudios que relación la producción agrícola, suelos y microbiología del cultivo.

¿Qué es la Marchitez en caña de azúcar?

En el suelo habitan microorganismos patógenos como los hongos y oomicetos que son muy difíciles de controlar, lo que limita la productividad agrícola (Jayaraman et al., 2021). Entre los principales agentes causales de enfermedades se encuentran especies de los géneros *Fusarium spp.*, *Verticillium spp.*, *Phytophthora spp.*, *Pythium spp.* y especies como *Rhizoctonia solani* y *Gaeumannomyces graminis*. Estos géneros provocan grandes pérdidas en el rendimiento y calidad en la producción de alimentos. Se estima que las pérdidas causadas por hongos alcanzan hasta un 78% (Du et al., 2022). La marchitez en caña de azúcar es una enfermedad que afecta el transporte de agua y nutrientes en la planta, provoca síntomas como tallos marchitos o secos, reducción del rendimiento y calidad del cultivo, esta enfermedad es un problema emergente que provoca una reducción del rendimiento hasta

del 50%, afecta tanto la productividad (toneladas por hectárea) como la calidad del jugo azucarado. Las plantas afectadas presentan tallos una coloración interna rojiza o marrón, marchitez en las hojas y secado de tejidos, lo que compromete los sistemas vasculares encargados del transporte de agua y nutrientes (Mello et al., 2025).

La marchitez de la caña se atribuye a *Fusarium spp.*, *Colletotrichum falcatum* y a *Phaeocystostroma (Pleocyta) sacchari* como agentes causales. El género *Fusarium* es reconocido como uno de los principales grupos de hongos patógenos asociados a esta enfermedad ya que infecta raíces y tejidos vasculares y causa necrosis, obstrucción del sistema de conducción y eventualmente la marchitez y muerte de las plantas. Entre las especies que causan esta enfermedad están *F. andiyazi*, *F. nygamai* y *F. sacchari*. Además de *Fusarium*, también se ha reportado que otros hongos *Colletotrichum falcatum* y *Phaeocystostroma (Pleocyta) sacchari* se consideran agentes causales de marchitez en caña de azúcar (Martínez-Jaimes et. al., 2020).

La marchitez causada por fitopatógenos del género *Fusarium* son un grave problema fitosanitario en muchos cultivos, incluida la caña de azúcar. En este contexto, la supresividad del suelo representa una alternativa sustentable a los métodos químicos de control, ya que reduce la severidad de la enfermedad sin necesidad de aplicar fungicidas o tratamientos agresivos (Todorović et al., 2023).

¿Supresividad del suelo o defensa natural contra fitopatógenos?

Tradicionalmente el control de hongos es mediante productos químicos, pero su uso excesivo y por tiempo prolongado provocan efectos adversos en el suelo. Además de la contaminación se provoca acidificación y salinización, disminución de materia orgánica y pérdida de la diversidad genética (Kopittke et al., 2019). Por lo que para llevar a cabo un manejo sustentable se deben implementar estrategias que disminuyan el impacto negativo de los compuestos químicos. Una alternativa es el estimular las defensas naturales de las plantas activadas por la estimulación y el soporte selectivo de poblaciones de microorganismos antagonistas (Weller et al., 2002).

La supresión es un fenómeno multifactorial y complejo, existen características fisicoquímicas del suelo afectan la composición y actividad de las comunidades microbianas. También los exudados vegetales promueven la incorporación, activación y desarrollo de microorganismos benéficos para protegerse de los fitopatógenos. La supresión de una enfermedad con respecto a su severidad puede ser a través de competencia y/o antibiosis (directa) o de forma indirecta por la inducción de mecanismos de defensa de la planta (Carrión et al., 2018; Garbeva et al., 2004; Steinberg et al., 2019).

Por otra parte, los microorganismos que habitan en los suelos supresivos llegan a liberar metabolitos que son capaces de controlar a los agentes patogénicos. Estos procesos se pueden elucidar gracias a las herramientas ómicas en conjunto con las técnicas microbiológicas que demuestran la interacción planta/microorganismo (Carrión et al., 2018).

¿Qué secretos esconde el microbioma 16S y ITS del suelo?

Las técnicas tradicionales de cultivo han demostrado ser limitadas en el estudio de microbiotas complejas, ya que sólo una fracción de los microorganismos presentes en el suelo es cultivable. Estos métodos permiten describir no solo la composición taxonómica, sino también patrones de abundancia y diversidad que son cruciales para distinguir entre suelos supresivos y conductivos. En algunos estudios se ha observado que suelos con supresividad inducida presentan perfiles de *Proteobacteria*, *Acidobacterias* y *Ascomycota* dominantes, lo que sugiere que ciertos grupos microbianos podrían estar asociados funcionalmente a la supresión de enfermedades (Vida Hinojosa et al., 2015).

El microbioma de la rizosfera de las plantas puede contribuir a la supresión (Almario et al., 2014; Gómez Expósito y otros, 2017). El suelo representa el reservorio más rico conocido de biodiversidad microbiana (Curtis y otros, 2002; Wang y otros, 2016) y muestra varios compartimentos, es decir, el suelo a granel que contiene microorganismos que no se ven afectados por las raíces, la rizosfera donde los microorganismos del suelo están bajo la influencia de las raíces (y los exudados de las raíces), el rizoplaneo con microorganismos adheridos a las raíces y la endosfera para los tejidos de la raíz colonizados por microorganismos (Sánchez-Cañizares et al., 2017).

La secuenciación del gen 16S rRNA es una de las herramientas más utilizadas para estudiar comunidades bacterianas y arqueanas. Este gen contiene regiones conservadas e hipervariables que permiten la identificación taxonómica de microorganismos presentes en una muestra ambiental (Caporaso et al., 2012). De forma complementaria, la región ITS (Internal Transcribed Spacer) es el marcador molecular más utilizado para la identificación de hongos debido a su alta variabilidad genética (Schoch et al., 2012).

La combinación de análisis 16S e ITS proporciona una visión integral del microbioma del suelo. Estos métodos permiten describir no solo la composición taxonómica, sino también patrones de abundancia y diversidad que son cruciales para distinguir entre suelos supresivos y conductivos. Estudios previos han demostrado que determinados grupos microbianos pueden estar asociados con la supresión natural de enfermedades del suelo.

El microbioma de la rizosfera desempeña un papel fundamental en la salud vegetal. La rizosfera corresponde a la zona del suelo influenciada directamente por las raíces de las plantas, donde los exudados radicales favorecen el establecimiento de microorganismos benéficos (Philippot et al., 2013).

METODOLOGÍA

Area de estudio y muestreo

El trabajo se realiza en la zona cañera de la zona centro de Veracruz, específicamente en el área de influencia de los Ingenios el Modelo (19° 37' 81.96" LN y 96° 36' 96.59" LO) y La Gloria (19° 42' 85.

85" LN y 96° 40' 03.11" LO) emprendiendo con dos municipios, Úrsulo Galván y Actopan (Figura 1). El clima de esta región se clasifica como Aw (tropical húmedo-seco) por el sistema Köppen-Geiger, definido como cálido subhúmedo con lluvias en verano, con un rango de temperatura que oscila entre 24 y 26 °C, y un rango de precipitación entre 1100 y 1300 mm (INIPA, 2013).

Área geográfica



Figura 1. Ubicación de los municipios de Actopan y Úrsulo Galván, Veracruz, México. Fuente: INEGI, 2020.

En cada municipio se ubicaron cultivos de caña de azúcar con presencia de síntomas de marchitez (Figura 2) y sitios geográficamente muy próximos a estos sitios, sin presencia de síntomas.



Figura 2. Cultivos de caña de azúcar con presencia de síntomas de marchitez

Se tomaron los datos de la sintomatología presente en las plantas, así como las características físicas de las parcelas, variedad de caña de azúcar, tiempo de siembra y manejo agronómico que se le realiza. Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 0–20 cm (Figura 6) y se transportaron a los Laboratorios de Agua, Suelo y Planta y el de Biología Molecular para su posterior análisis. Por otra parte, se tomaron fragmentos de tejido vegetal de plantas que presenten la sintomatología característica a la marchitez y fueron transportados al Laboratorio de Biología Molecular para el

aislamiento e identificación del o los agentes causales siguiendo los postulados de Koch (Figura 3) y técnicas moleculares.



Figura 3. Esquema ilustrativo de los postulados de Koch. Generada con IA

Caracterización fisicoquímica del suelo

A las muestras de suelo se les realizó un análisis de fertilidad completo que incluye la textura, humedad, densidad aparente, materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes.

Aislamiento del agente causal de la marchitez

Se colocaron tallos de caña de azúcar sintomáticas, en cámara húmeda en condiciones controladas con una humedad relativa del 70%, un fotoperiodo de 16/8 h de luz/oscuridad a 25 °C (día) y 22 °C (noche) durante la primera semana, y a 28 °C (día) y 26 °C (noche) después. Una vez que se observaron signos y síntomas se tomaron muestras y se multiplicaron los microorganismos para obtener por una parte cultivos puros para realizar los postulados de Koch y por otra parte obtener muestras para la identificación molecular.

Se realizaron pruebas de patogenicidad, de los aislamientos obtenidos. Se inocularon tallos sanos mediante apertura mecánica y discos de micelio fúngico mediante infección directa del tejido. Tras siete días en condiciones controladas en una cámara de crecimiento, se evaluaron los tallos y se observaron los síntomas. La patogenicidad se confirmó mediante el reaislamiento del o de los agentes causales a partir de los tallos inoculados. Los aislados obtenidos del reaislamiento, cerrando así el postulado de Koch, se secuenciarán para confirmar el género y la especie.

Para la secuenciación se realizó la extracción de ADN de los aislamientos con el kit ZymoBIOMICS® DNA Miniprep siguiendo las indicaciones del fabricante. Se determinó la cantidad y calidad del ADN extraído empleando un espectrofotómetro de micro volumen NanoDrop® (Thermo Fisher®) a una

absorbancia de 260/280 nm. Las muestras de ADN se enviarán al Laboratorio Zymo Research Corp para Servicio de secuenciación de amplicones 16S/ITS. Identificación de bacterias, arqueas y hongos a partir de cualquier muestra de microbioma.



Figura 4. Kit ZymoBIOMICS® DNA Miniprep.

RESULTADOS

La Sintomatología observada en plantas de caña de azúcar son compatibles con marchitez asociada a *Fusarium* spp. Se observaron plantas con amarillamiento inicial y pérdida de vigor, evidenciada por la clorosis progresiva de las hojas basales, incremento de la necrosis foliar y secado de hojas inferiores, acompañado de reducción del crecimiento vegetativo. El estado avanzado de la enfermedad, caracterizado por marchitez, pérdida de área foliar y deterioro del cultivo llevan al secado severo del follaje y muerte progresiva de plantas, formando manchones de afectación en campo. Estos síntomas son consistentes con daños vasculares y alteraciones fisiológicas frecuentemente asociadas a infecciones causadas por especies del género *Fusarium*.

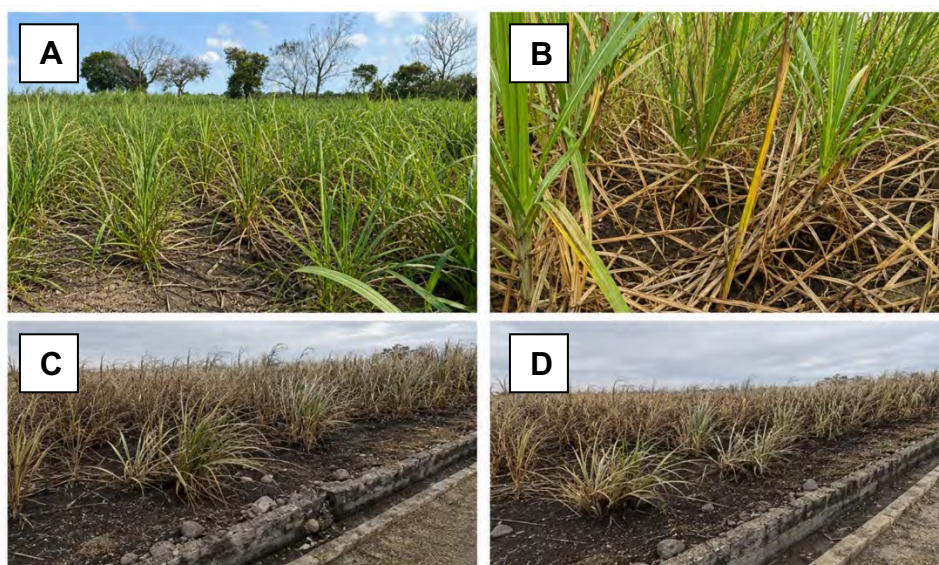


Figura 5. Sintomatología presente en las plantas de caña de azúcar, A) Cañal no enfermo, b) cañal enfermo con un menor daño, c) y d) son cañales enfermos con daño total.

Los resultados obtenidos a partir de las muestras de suelo recolectadas permitieron caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, así como evaluar la composición y diversidad del microbioma asociado al cultivo de caña de azúcar.

Análisis fisicoquímicos

Se presentan los resultados obtenidos del análisis de fisicoquímicos de seis muestras de suelo provenientes de dos municipios Actopan y Úrsulo Galván cultivados con caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) en el estado de Veracruz. A través de la evaluación de variables críticas como la textura del suelo, los niveles de materia orgánica y el pH, se establece un diagnóstico actual de la fertilidad de los suelos evaluados. Estos datos sirven como base fundamental para el diseño de estrategias de manejo agronómico y planes de fertilización específicos para las condiciones de la región.



Figura 6. Proceso del muestreo de suelo. Imagen generada con IA



Figura 7. Resultados del análisis fisicoquímico de muestra de suelo proveniente del cañal enfermo ubicado en la localidad de Mozombo, Veracruz. Imagen generada con IA.



Figura 8. Resultados del análisis fiscoquímico de muestra de suelo proveniente del cañal no enfermo ubicado en la localidad de Mozombo, Veracruz.



Figura 9. Resultados del análisis fiscoquímico de muestra de suelo proveniente del cañal enfermo ubicado en la localidad de Real del Oro, Veracruz.



Figura 10. Resultados del análisis fiscoquímico de muestra de suelo proveniente del cañal no enfermo ubicado en la localidad de Real del Oro, Veracruz. Generado con IA.

Extracción de ADN

Los resultados muestran que la concentración de ADN extraído de la rizosfera fue relativamente constante entre las muestras, lo que sugiere una distribución homogénea de la biomasa microbiana en esta zona. En contraste, el suelo del primer muestreo presentó una alta variabilidad, con valores máximos en la muestra c4, lo que podría estar relacionado con diferencias en la composición del suelo o en la eficiencia de extracción. El segundo muestreo de suelo mostró en general concentraciones menores, lo que sugiere una posible disminución en la cantidad de ADN extraíble o cambios en las condiciones del suelo entre muestreos.



Figura 11. Resultados de extracción de ADN de rizosfera y suelo de caña de azúcar asociados a suelos supresivos, c1= Cañal enfermo quemado M, c2= cañal enfermo sin cortar M, c3= canal no enfermo M, c4= cañal enfermo quemado RO, C5= cañal enfermo sin cortar RO, c6= cañal no enfermo RO. Las letras diferentes (M y RO) indican la zona de recolección de la muestra, Mozomboia Mpio. de Actopan Ver. y Real del Oro Mpio. Úrsulo Galván Ver.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los suelos presentan condiciones químicas aceptables para el cultivo de caña de azúcar, especialmente por sus valores adecuados de pH y baja salinidad. Sin embargo, se identificaron limitaciones importantes relacionadas con el bajo contenido de materia orgánica y deficiencias de potasio en varias muestras, particularmente en la figura 7. Las texturas arcillosas podrían presentar problemas de compactación y drenaje, mientras que los suelos más arenosos requerirán estrategias para conservar humedad y nutrientes. Los microorganismos del suelo como bacterias, hongos, patógenos en los cultivos de Caña de azúcar, se favorecen de estas condiciones lo que aumenta su propagación reduciendo liberación de nutrientes, fijación de nitrógeno y creando deficiencia de la

estructura del suelo. Las condiciones fisicoquímicas observadas en las muestras pueden afectar positiva o negativamente su desarrollo.

Los resultados de concentración de ADN obtenidos mediante espectrofotometría (NanoDrop) evidencian diferencias importantes entre los tipos de muestra analizados (rizosfera y suelo) y entre los dos tiempos de muestreo. En las muestras de rizosfera, las concentraciones oscilaron entre 4.1 y 7.8 ng/μL, mostrando una variabilidad relativamente baja en comparación con las muestras de suelo. Este comportamiento sugiere una distribución más homogénea de la biomasa microbiana en la zona rizosférica, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura, donde la cercanía a las raíces favorece una mayor actividad microbiana y, por ende, una mayor disponibilidad de ADN.

Por otro lado, las muestras correspondientes al suelo del primer muestreo presentaron una variabilidad considerable (2.7 a 11.4 ng/μL), destacando particularmente la muestra c4 con la mayor concentración registrada (figura 11). Esto puede atribuirse a diferencias en la composición del suelo, contenido de materia orgánica, humedad, así como a la distribución espacial de los microorganismos. Asimismo, no se descarta la influencia de factores técnicos asociados al proceso de extracción, los cuales pueden afectar la eficiencia de recuperación de ADN. En el caso del segundo muestreo de suelo, se observó una tendencia general a concentraciones menores (2.7 a 7.5 ng/μL) en comparación con el primer muestreo. Este comportamiento podría indicar una disminución en la biomasa microbiana o cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo entre ambos periodos de muestreo. Alternativamente, también podría reflejar variaciones en la eficiencia del protocolo de extracción o la presencia de compuestos inhibidores, como ácidos húmicos, que son comunes en matrices edáficas y pueden interferir con la cuantificación.

Los resultados sugieren que la rizosfera presenta una mayor estabilidad en la recuperación de ADN, mientras que el suelo muestra una mayor variabilidad tanto espacial como temporal. Con el análisis en el Laboratorio Zymo Research Corp se logrará tener el microbioma completo lo que confirmara o descartara que la marchitez de la caña de azúcar es causada por factores bióticos, principalmente por la asociación de hongos patógenos que causan la muerte de las plantas, lo que genera desafíos postcosecha para la industria.

REFERENCIAS

- AlmarioJ.MullerD.DéfagoG.MoënnelocozY. (2014). Rhizosphere ecology and phytoprotection in soils naturally suppressive to Thielaviopsis black root rot of tobacco. *Environ. Microbiol.* 16, 1949–1960. doi: 10.1111/1462-2920.12459
- Agrios, G. N. (2005). Plant pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press.

- Carrión, V. J., Cordovez, V., Tyc, O., Etalo, D. W., de Bruijn, I., de Jager, V. C. L., Medema, M. H., Eberl, L., and Raaijmakers, J. M. (2018). Involvement of Burkholderiaceae and sulfurous volatiles in disease-suppressive soils. *The ISME Journal*,
- Caporaso, J. G., et al. (2012). Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms. *ISME Journal*, 6, 1621–1624.
- CurtisT. P.SloanW. T.ScannellJ. W. (2002). Estimating prokaryotic diversity and its limits. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*99, 10494–10499. doi: 10.1073/pnas.142680199 2(9), 2307-2321. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0186-x>
- Garbeva, P., van Veen, J. A., and van Elsas, J. D. (2004). Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. *Annual Review of Phytopathology*, 42(1), 243-270. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.012604.135455>
- Gómez ExpósitoR.de BruijnI.PostmaJ.RaaijmakersJ. M. (2017). Current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils. *Front. Microbiol.*8. doi: 10.3389/fmicb.2017.02529
- INEGI. (2020, marzo 4). *México en cifras*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI; Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas?ag=300040001>
- Jayaraman, S., Naorem, A. K., Lal, R., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Patra, A. K., and Chaudhari, S. K. (2021). Disease suppressive soils—beyond food production: A critical review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1437-1465. <https://doi.org/10.1007/s42729-02100451-x>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., and Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132(105078), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing.
- Martínez-Jaimes, P., Martínez Fernández, E., Guillén-Sánchez, D., Suárez-Rodríguez, R., Ramírez-Trujillo, J. A., & Hernández-Velázquez, V. (2020). Necrosis de la raíz de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) causada por *Fusarium* spp. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 6(1). <https://doi.org/10.30973/aap/2020.6.0061007>
- Mello, F. E., Mathioni, S. M., de Jesus, S. P., Hirata, E., & Marques, D. B. (2025, enero 21). Sugarcane wilt syndrome: An emerging challenge. *Cultivar Semanal* (N.º 14). *Revista Cultivar*. <https://revistacultivar.com/articles/Sugarcane-wilt-syndrome-an-emerging-challenge>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11, 789–799.

- Sánchez-Cañizares C., Jorrín-B. Poole P., S. Tkacz A. (2017). Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome. *Curr. Opin. Microbiol.* 38, 188–196. doi: 10.1016/j.mib.2017.07.001
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024, mayo). Caña de azúcar: Una dulce producción. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11, 789–799.
- Todorović, S., et al. (2023). Microbial diversity in soils suppressive to *Fusarium* diseases. [Review]. *Frontiers in Plant Science*. [Abstract retrieved from PubMed].
- Vida Hinojosa, C. M., De-Vicente-Moreno, A., & Cazorla-López, F. M. (2015). El microbioma de un suelo agrícola supresivo. Universidad de Málaga Institutional Repository.

MATERIAL TÉRMICO COMPUESTO POR UNA MATRIZ POLIMÉRICA (POLIESTIRENO EXPANDIDO-EPS) REFORZADA CON PARTÍCULAS CONSOLIDADAS DE CASCARÓN DE HUEVO PULVERIZADO (CACO3)

Ana Roselyn Pérez Méndez¹

Mario Perez Acosta²

Rosario Castro García³

RESUMEN

El desarrollo de materiales compuestos sostenibles representa una estrategia relevante para reducir el impacto ambiental de los residuos y mejorar la eficiencia energética en edificaciones. En este contexto, la presente investigación aborda el desarrollo de un material compuesto térmico conformado por una matriz polimérica de poliestireno expandido reciclado (EPS) reforzada con partículas de carbonato de calcio (CaCO_3) obtenidas a partir de cascarón de huevo pulverizado. Su caracterización física, mecánica, térmica y química confirma una estructura celular cerrada con dispersión homogénea del refuerzo, lo que proporciona estabilidad dimensional, baja absorción de humedad y adecuada relación peso-resistencia. El material presenta mejora en rigidez y resistencia mecánica dentro de rangos funcionales de aplicación, así como baja conductividad térmica, permitiendo reducir la transferencia de calor y contribuir a la eficiencia energética en edificaciones. Los análisis químicos confirman la compatibilidad entre componentes sin reacciones adversas, mientras que su comportamiento frente a flamabilidad muestra propagación de flama controlada bajo metodologías normalizadas (ASTM D635). Este material representa una alternativa sustentable para aislamiento térmico, promoviendo el aprovechamiento de residuos plásticos y orgánicos bajo principios de economía circular. La densidad del material se encuentra en el orden de 900 g/cm^3 para aplicaciones en pared y aproximadamente 1.22 g/cm^3 para aplicaciones en horno, valores que evidencian la presencia de una estructura celular cerrada, característica del poliestireno expandido, lo cual contribuye tanto a la reducción de peso como a la mejora de las propiedades de aislamiento térmico del material.

En términos de comportamiento mecánico, presenta un módulo de ruptura (MOR) de 33.5 MPa, acompañado de un porcentaje de deformación de 23.54 % y un módulo de elasticidad de 627.77 kg/cm^2 , lo que indica que el material posee una adecuada combinación de rigidez y capacidad de deformación, permitiendo absorber esfuerzos sin fracturarse de forma frágil. Estas propiedades

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla. arperez@itsm.edu.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla. marioperez@itsm.edu.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla. rcastro@itsm.edu.mx

resultan particularmente relevantes para su aplicación en elementos constructivos donde se requiere estabilidad dimensional y resistencia mecánica dentro de rangos funcionales de operación. Desde el punto de vista térmico, el material presenta un coeficiente de conductividad térmica de $0.408 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo cual confirma su capacidad para reducir la transferencia de calor a través del material. Además, registra una difusividad térmica de $0.309 \text{ mm}^2/\text{s}$ y una capacidad calorífica volumétrica de $1.320 \text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$, parámetros que reflejan su capacidad para almacenar y disipar energía térmica de manera controlada, contribuyendo a mejorar el desempeño térmico en sistemas constructivos.

Palabras clave: Materiales compuestos, poliestireno expandido reciclado, carbonato de calcio, cascarón de huevo, aislamiento térmico, economía circular.

PROBLEMA PARA RESOLVER

El incremento en la generación de residuos poliméricos, particularmente poliestireno expandido (EPS), así como de residuos agroindustriales como el cascarón de huevo, representa un desafío ambiental significativo debido a su difícil degradación y limitada reutilización. Paralelamente, el sector de la construcción demanda materiales con mejores propiedades de aislamiento térmico que contribuyan a reducir el consumo energético en edificaciones. Aunque existen materiales aislantes comerciales, muchos de ellos presentan costos elevados, procesos de fabricación intensivos en energía o escasa incorporación de residuos reciclados. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar materiales compuestos sostenibles capaces de aprovechar residuos y al mismo tiempo mejorar las propiedades térmicas y estructurales de elementos constructivos.

METODOLOGÍA

Los materiales compuestos se caracterizan por la combinación de dos o más fases con propiedades físicas o químicas diferentes, cuya interacción genera propiedades funcionales superiores a las de sus componentes individuales (Callister y Rethwisch, 2018). En este tipo de sistemas, el comportamiento final del material depende significativamente de su microestructura, particularmente de la dispersión del material de refuerzo dentro de la matriz y de la calidad de la interfaz matriz-refuerzo, responsable de la transferencia de esfuerzos dentro del sistema (Hull & Clyne, 1996).

Para la formulación del material compuesto se hace por medio de diseño de mezclas considerando una etapa de preparación de materias primas, que incluyó lavado, trituración, secado, molienda, y tamizado del cascarón de huevo, así como la reducción de tamaño del poliestireno expandido reciclado (Figura N° 1). Estas operaciones permitieron obtener partículas con tamaños más uniformes, favoreciendo el incremento del área de contacto entre los componentes y mejorando la interacción interfacial (Ashby, 2011).

Posteriormente, los materiales fueron integrados mediante un proceso de mezclado usando las siguientes proporciones 43% de cascarón, 15% de poliestireno expandido y 42% de solvente, hasta conseguir una consistencia plástica, realizado mediante amasado manual, lo que permitió promover la dispersión de las partículas de CaCO_3 dentro de la matriz polimérica. Una adecuada dispersión de partículas contribuye a la formación de una microestructura homogénea, lo que permite una transmisión más eficiente de las cargas dentro del material compuesto y reduce la presencia de zonas débiles o aglomeraciones (Chawla, 2012).



Figura N° 1 Mapa de proceso

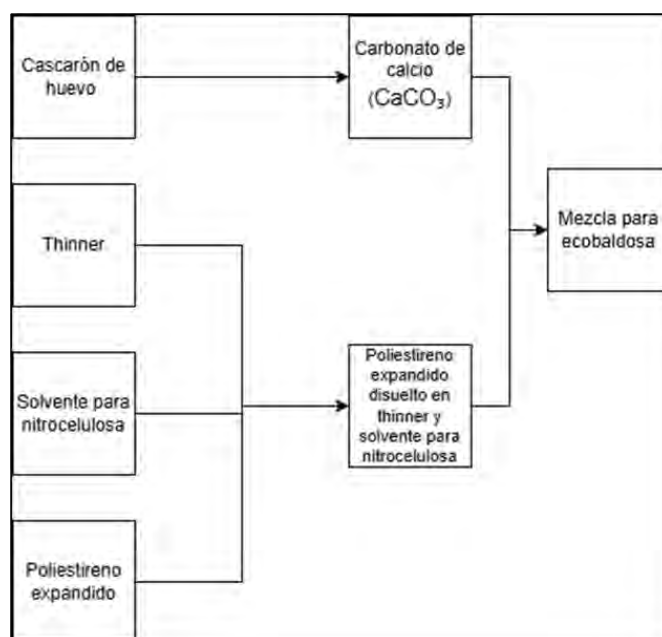


Figura N° 2 Mapa de proceso

RESULTADOS

La norma ISO 10545-2 define los métodos para determinación de las dimensiones y de la calidad de superficial de las baldosas. De naturaleza física, ya que se dirige a medir las propiedades dimensionales de la baldosa. A continuación, se muestran los resultados obtenidos. Las medidas nominales se expresan en centímetros e indican las dimensiones tomadas con el vernier. Según la norma, para la baldosas de hasta 150 mm, la tolerancia es de ± 1.5 . los resultados nos indican que si cumple con la normatividad con una medida de 150.02 mm. de longitud, 150.03 mm. de ancho, y 20.05 mm. de grosor.



Figura N° 1 Dimensiones tomadas con vernier

Fuente: Propia

Tabla 1 Toma de Muestra de Dimensiones

Parámetro	Medida nominal	Medida Real	Tolerancia Permitida	Cumple
Longitud	15 cm.	150.02 mm.	$\pm 1.5 (\pm 0.5\%)$	Si
Anchura	15 cm.	150.03 mm.	$\pm 1.5 (\pm 0.5\%)$	Si
Grosor	2 cm.	20.05 mm.	$\pm 1.5 (\pm 0.5\%)$	Si

Para el ensayo de rectitud se midió una desviación máxima de 0.3 mm de un lado de 150 mm. la desviación utilizando la ecuación (3.1) nos indicó lo siguiente:

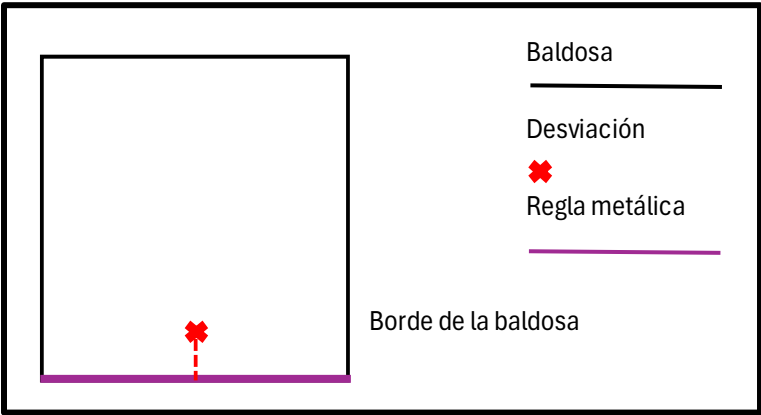


Figura No 4 Procedimiento para medir la rectitud de los lados

Fuente: Propia

Desviación % = $\left(\frac{0.3}{150}\right) \times 100 = 0.2\%$

El proceso se muestra en la Figura 4 la línea de color morada que es la regla metálica se colocó a lo largo del borde de la baldosa como referencia para determinar si el borde es recto. La marca roja es el espacio más grande entre el borde de la baldosa y la regla metálica, así como la línea punteada indica como medir la desviación. El resultado es 0.2 % y como está dentro del límite de la norma de 0.5 %, si cumple con la norma.

Después de someter la baldosa a una inspección visual, se destacaron defectos estéticos y físicos y determinar el porcentaje libres de defectos para el aspecto superficial. Enseguida se realizó una evaluación táctil. Se paso la mano sobre la superficie para detectar irregularidades no visibles, como son las grietas, o rugosidades. La importancia de garantizar que la baldosa sea visiblemente atractiva y uniforme a la vista del cliente final.

Tabla 21 Criterios de Aceptación

Criterios	Distancia Visual	Apta	No Apta	Retrabajable
Grietas o astillados mayor a 1 mm. de profundidad o largo	1 metro	x		
Variaciones de color	1 metro	x		
Burbujas de aire	1 metro	x		
Superficie uniforme	no 1 metro	x		



Figura 5 Inspección visual de la baldosa

Fuente: Propia

La norma ISO 10545-3 describe cómo realizar la prueba de absorción de agua, porosidad abierta, densidad relativa aparente y densidad aparente en baldosas. La muestra de la baldosa se seca completamente y se pesa para obtener su peso inicial. Seleccionar la muestra representativa de la baldosa. Pesaje de muestras preliminares en diferentes muestras.

Tabla 3 Densidad Aparente Para Los Pesos Iniciales Del Ensayo Fuente: Propia

Tabla 3.1 Placa	Densidad Aparente (g/cm ³)
Placa A	75.09
Placa B	126.03
Placa C	93.09


Figura 6 Pesaje de las muestras

Fuente: Propia

Se sumerge la baldosa, durante la ebullición, el agua penetra en los poros abiertos de la baldosa, llenando aquellos poros que pueden ser impregnados fácilmente. Después de un tiempo de ebullición específico, la muestra se enfría en el agua y se retira para secarla superficialmente. Finalmente, se pesa de nuevo para determinar la cantidad de agua absorbida. La diferencia de peso antes y después del proceso revela la absorción de agua del material.


Figura 2 Ensayo a temperatura ambiente

Fuente: Propia.

Tabla 4 Densidad Aparente Para Los Pesos Secundarios Del Ensayo Fuente: Propia

Placa	Densidad Aparente (g/cm ³)
Placa A	78.81
Placa B	131.88
Placa C	93.09

Los resultados de absorción de agua para cada placa son los siguientes:

Tabla 52 Porcentaje De Absorción Obtenido Para Cada Placa

Placa	Porcentaje de Absorción (%)
Placa A	4.95%
Placa B	4.64%
Placa C	4.21%

Con un promedio del 4% de absorción, estas baldosas se pueden clasificar en un rango que sugiere una mayor resistencia a la intemperie y ambientes húmedos, haciéndolas adecuadas para usos en interiores y exteriores en condiciones controladas

Expansión Por Humedad, este proceso de la prueba de expansión por humedad en baldosas cerámicas está regulado por la norma ISO 10545-10. Esta normativa establece los métodos para determinar la expansión de las baldosas cerámicas cuando se exponen a condiciones de humedad, asegurando que las baldosas cumplan con los requisitos de estabilidad dimensional en entornos húmedos. Pesaje de muestras preliminares en diferentes muestras.

Placa A: 166 g.

Placa B: 138.79 g.


Figura 3 Prueba de Expansión

Fuente: Propia

Se sumergen las muestras de prueba en el agua durante 24 hrs. $\pm$ 30 min. consecutivas, asegurando que haya al menos 5 cm de agua por encima de las muestras y que no se tocan entre si ni tocan la base o los lados del recipiente. Se registran las medidas y se determina la media de las dos mediciones antes del tratamiento en agua y el después.

Placa A: 166.30

Placa B: 138.55 g.



Figura 4 Baldosa después del ensayo

Fuente: Propia

Resultado de prueba de impermeabilidad: La expansión de la humedad es: 0.3 milímetros por metro (mm/m). Valor Sugerido 0.6. 100% Impermeable a 24 hrs.



Figura 5 Cámara de Ensayo Salina

Fuente: Propia

Se preparo la solución de cloruro de sodio al 5% en agua desionizada. Con un pH Neutro. Se coloca las muestras dentro de la cámara, con una colocación de inclinación de 30° respecto a la horizontal de la base, con la finalidad de que estén posicionadas de manera uniforme y sin contacto entre las dos baldosas. La temperatura debe de ser de $35^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$. Temperatura Interna: Inicial 30.3°C
Temperatura Externa: Inicial 32.7°C , Humedad: 42%.



Figura 6 Compresor

Fuente: Propia

Se comprueba la temperatura ambiente, y la temperatura del saturador. Se controla el nivel de solución salina en el tanque y se asegura de que haya suficiente para las próximas 24 horas. La baldosa cumple con la resistencia a la corrosión, ya que al término del ensayo no se encuentra ningún desprendimiento visible. Su envoltorio de corrosión se declarará en conformidad con ISO 9227 NSS (niebla salina neutra) sin desprendimiento a 24 horas de BS ISO 9227 NSS.

La densidad del material se encuentra en el orden de 900 g/cm^3 para aplicaciones en pared, basado en la fórmula general, y aproximadamente 1.22 g/cm^3 para aplicaciones en horno, valores que evidencian la presencia de una estructura celular cerrada característica del poliestireno expandido, lo cual contribuye tanto a la reducción de peso como a la mejora de las propiedades de aislamiento térmico del material.

En términos de comportamiento mecánico, presenta un módulo de ruptura (MOR) de 33.5 MPa, acompañado de un porcentaje de deformación de 23.54 % y un módulo de elasticidad de 627.77 kg/cm^2 , lo que indica que el material posee una adecuada combinación de rigidez y capacidad de deformación, permitiendo absorber esfuerzos sin fracturarse de forma frágil. Estas propiedades resultan particularmente relevantes para su aplicación en elementos constructivos donde se requiere estabilidad dimensional y resistencia mecánica dentro de rangos funcionales de operación.

Desde el punto de vista térmico, el material presenta un coeficiente de conductividad térmica de $0.408 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (NOM-008-SCFI vigente), lo cual confirma su capacidad para reducir la transferencia de calor a través del material. Además, registra una difusividad térmica de $0.309 \text{ mm}^2/\text{s}$ y una capacidad calorífica volumétrica de $1.320 \text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$, parámetros que reflejan su capacidad para almacenar y disipar energía térmica de manera controlada, contribuyendo a mejorar el desempeño térmico en sistemas constructivos.

En cuanto a su comportamiento frente a condiciones ambientales, presenta un porcentaje de impermeabilidad del 100 % después de 24 horas de prueba, lo que indica una alta resistencia a la absorción de agua (ISO 10545-10). Asimismo, en pruebas de niebla salina no se observó desprendimiento ni deterioro del material, lo que demuestra su estabilidad frente a ambientes agresivos o de alta humedad (ISO9227:2022).

El contenido de humedad del material es aproximadamente 4 %, valor que se mantiene dentro de rangos adecuados para materiales compuestos utilizados en aplicaciones constructivas, evitando alteraciones significativas en sus propiedades mecánicas o dimensionales (NOM-226-SCFI-2018).

Finalmente, en términos de comportamiento frente al fuego, el material presenta una velocidad de combustión de 10.97 mm/min, evaluada bajo metodologías normalizadas de inflamabilidad (ASTM D635), lo que indica una propagación de flama controlada dentro de los límites establecidos para materiales poliméricos, permitiendo su uso en aplicaciones donde se requiere un desempeño seguro frente a condiciones térmicas moderadas.

La flamabilidad de las baldosas se evaluó siguiendo el Método de pruebas estándar para velocidad de combustión y/o intensidad y tiempo de combustión. Se cortan muestras de las baldosas en barras 125 $\pm$ 5 mm de largo 13 $\pm$ 5 mm de ancho, y un espesor mínimo de 3 mm. Las muestras se acondicionaron a 23 $\pm$ 5°C y 50 $\pm$ 5% de humedad relativa. Se utiliza un mechero de laboratorio ajustado para que su llama mida 20mm de altura, suministro de gas, malla asbesto, soporte universal, 2 pinzas de tres dedos, un higrómetro para medir humedad relativa, un termómetro de laser. El mechero se coloca con un ángulo de inclinación de 45°, la barra de la baldosa se coloca a 10 $\pm$ 1 cm de distancia de la malla y la mecha de la flama se coloca directamente en el extremo de la barra.



Figura 72 Prueba de velocidad de flamabilidad-a

Fuente: Propia

El procedimiento de ensayo con las ecobaldosas ya cortadas en barras rectangulares con las siguientes dimensiones: Longitud: 125 ± 5 mm; Ancho: 13 ± 0.5 mm; Espesor: 3 mm (mínimo). Se inicia acondicionando las muestras a una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa de $20 \pm 5\%$. El quemador de laboratorio se ajusta para producir una llama con una altura de 20 mm. El quemador se coloca de manera que la llama incidiera sobre el extremo libre de la muestra de prueba a una profundidad aproximada de 6 mm. Con ayuda de las pinzas de 3 dedos las muestras fueron posicionadas horizontalmente en el soporte, y bajo la muestra se coloca una malla de asbesto para atrapar cualquier partícula incandescente que cayera durante la prueba.

Posteriormente la llama del quemador se aplica al extremo libre de la muestra durante 30 ± 1 segundos.

El dispositivo de cronometraje comienza al aplicar la llama. Se observa si las muestras siguen ardiendo con llama o incandescencia visible después de retirar la llama del quemador, se registra cuanto tiempo permanece encendida después de retirar la llama, y la longitud que se alcanzó a quemar antes de que se consumiera el fuego. Además, se registra si la muestra presentaba goteo o caídas de material incandescente.



Figura 83 Prueba de velocidad de flamabilidad-b

Fuente: Propia

La velocidad de combustión de las ecobaldosas se calcula midiendo la distancia que recorre el frente de llama en un tiempo determinado. Para realizar este cálculo se siguió el siguiente procedimiento:

Medición de la Longitud Quemada (L): Después de la aplicación de la llama durante 30 segundos, se monitorea el avance del frente de llama desde la marca de referencia inicial, situada a 25 mm del extremo encendido, hasta que alcanza la segunda marca a 100 mm. La distancia quemada, o longitud

quemada (L), se mide en milímetros. Si la llama no alcanzó la marca de 100 mm, se mide la distancia recorrida por el frente de llama desde la marca de 25 mm hasta el punto en el que se detuvo la combustión. Medición del Tiempo (t): Se registra el tiempo (en segundos) que tardó el frente de llama en recorrer la distancia entre las marcas de 25 mm y 100 mm. Este tiempo se mide utilizando un cronómetro de precisión.

Fórmula para el Cálculo de la Velocidad de Combustión (V):

La velocidad de combustión se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$V = \frac{60L}{t}$$

Donde:

V = velocidad de combustión, expresada en milímetros por minuto (mm/min).

L = longitud quemada, medida en milímetros (mm).

t = tiempo transcurrido en segundos (s) desde que el frente de llama alcanzó la marca de 25 mm hasta la marca de 100 mm.

Si la muestra no alcanzaba la marca de referencia de 25 mm después de la aplicación de la llama, se registraba como no inflamable. Si la llama alcanzaba la marca de 25 mm, se retiraba el quemador y se registraba el tiempo necesario para que el frente de llama avanzara hasta la marca de 100 mm o hasta que se extinguiera. El resultado promedio es de **109.7152743** mm/min. Luego se divide este valor entre el número total de muestras, que es **10**:

Y es así como obtenemos la velocidad de combustión es de **10.97 mm/min** para todas las muestras.

CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización física, mecánica, térmica y química confirman que material desarrollado con propiedades adecuadas para su aplicación en el sector de la construcción. La combinación de una matriz polimérica de baja conductividad térmica con un refuerzo mineral disperso homogéneamente permite obtener un material con estabilidad dimensional, resistencia mecánica funcional y capacidad de aislamiento térmico, características que lo posicionan como una alternativa viable para el diseño de sistemas constructivos energéticamente eficientes.

Los parámetros térmicos obtenidos evidencian la capacidad del material para reducir la transferencia de calor, lo que favorece su uso en aplicaciones como revestimientos de muros, recubrimientos de techos, sistemas de aislamiento en hornos o superficies expuestas a gradientes térmicos moderados. Asimismo, su alta impermeabilidad y estabilidad frente a ambientes salinos amplían su potencial de aplicación en entornos constructivos donde se requieren materiales con buena durabilidad y resistencia a condiciones ambientales adversas.

Desde una perspectiva tecnológica, el desarrollo de este material compuesto demuestra la viabilidad de integrar residuos plásticos y agroindustriales en productos con valor agregado, contribuyendo simultáneamente a la reducción de residuos y a la generación de soluciones sostenibles para la industria de la construcción. El uso de cascarón de huevo como fuente alternativa de carbonato de calcio y de poliestireno expandido reciclado como matriz polimérica representa un enfoque innovador que favorece la implementación de modelos de economía circular y valorización de residuos.

En términos de transferencia tecnológica, presenta un potencial para su escalamiento y aplicación industrial, particularmente en el desarrollo de materiales aislantes para edificaciones energéticamente eficientes, contribuyendo a la reducción del consumo energético asociado a climatización y al mejoramiento del confort térmico en espacios habitables.

Finalmente, el presente estudio abre nuevas líneas de investigación orientadas a optimizar la formulación del material, evaluar su desempeño en condiciones reales de operación y explorar procesos de fabricación a mayor escala, con el propósito de consolidar su implementación como material sostenible dentro del sector de la construcción y tecnologías de eficiencia energética.

REFERENCIAS

- Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed.). Springer.
- Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodríguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience*, 17, 1266–1280.
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). Wiley.

BIOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS COMO SUSTRATOS EN FERMENTACIÓN BIFÁSICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONIDIOS DE *BEAUVERIA BASSIANA*

Ilina Valeria Vásquez Hernández¹

Oscar Núñez Gaona²

Erick Adrián Juárez Arellano³

RESUMEN

El uso de pesticidas sintéticos para el control de plagas en los campos de cultivo ha desencadenado diversas problemáticas ambientales, desarrollo de resistencia e implicaciones a la salud humana. En la naturaleza existen hongos entomopatógenos que atacan a los insectos como parte de su ciclo de vida. *Beauveria bassiana* posee diversas características deseables. La producción de sus conidios depende en gran medida de las características fisicoquímicas y nutricionales del sustrato empleado. Por ello, en este trabajo se plantea la caracterización de distintos residuos agroindustriales lignocelulósicos con potencial para su aprovechamiento biotecnológico. Se emplearán como sustratos cascarilla de arroz, pseudotallo de plátano y corona de piña, materiales ampliamente disponibles en la región y con contenido relevante de fibra, humedad, materia orgánica y azúcares fermentables para ser aprovechados en procesos de fermentación en estado sólido.

El objetivo de este trabajo es evaluar la producción y calidad de conidios de *Beauveria bassiana* mediante fermentación bifásica utilizando dichos subproductos agrícolas como sustratos. Este proceso consiste en una primera fase líquida destinada a la producción de biomasa y blastosporas, seguida de una fase sólida enfocada en la producción de conidios aéreos.

Palabras clave: *Beauveria bassiana*, control biológico, fermentación bifásica y subproductos agrícolas.

INTRODUCCIÓN

Los efectos negativos de los pesticidas sintéticos en los ecosistemas y en la salud humana, junto con la creciente demanda de alimentos libres de residuos tóxicos, han impulsado el desarrollo de estrategias agrícolas sostenibles (Zhou *et al.*, 2025). El control biológico es un método menos agresivo y más eficiente dentro del manejo de plagas con el uso de formulados biológicos, los cuales pueden obtenerse a partir de organismos completos o de sus metabolitos, esto permite obtener cosechas

¹ Universidad del Papaloapan. ilival.vasher26@gmail.com

² Universidad del Papaloapan. oscarzng@unpa.edu.mx

³ Universidad del Papaloapan. erajuarez@unpa.edu.mx

sanas, sin contaminación ambiental y sin daños a la salud humana. (Ayaz *et al.*, 2023). Entre los agentes de control biológico más estudiados se encuentran los hongos *entomopatógenos* *Metarhizium anisopliae*, *Lecanicillium lecanii* y *Beauveria bassiana*, los cuales, destacan por su alta especificidad y eficacia en el control de insectos (Amobonye *et al.*, 2020). El mecanismo de infección consta de las siguientes fases: adhesión, germinación, penetración, colonización y producción de toxinas hasta provocar la muerte del insecto (Monzón, 2002). Su producción, se basa en la multiplicación masiva del hongo y sus estructuras reproductivas (esporas y/o conidios) en un sustrato natural. Se ha evaluado la obtención de productos comercializables a partir de residuos agroindustriales con el propósito de aportar un valor agregado y reducir la contaminación ambiental provocada por los mismos (Martí *et al.*, 2021). Sin embargo, existe información limitada sobre el uso de subproductos agrícolas que son propios de la región del Papaloapan, como corona de la piña y pseudotallo de plátano utilizándolos como sustratos no convencionales en fermentaciones en estado sólido para la producción de hongos entomopatógenos.

HIPÓTESIS

La fermentación bifásica empleando subproductos agrícolas no convencionales favorecerá la producción y calidad de conidios de *Beauveria bassiana*.

MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

Control biológico

El control biológico es una estrategia para disminuir el daño causado por plagas mediante el uso de organismos vivos, como depredadores o microorganismos patógenos, que actúan directa o indirectamente sobre ellas, mejorando la salud de las plantas (Lahlali *et al.*, 2022). En México, el uso de microorganismos entomopatógenos ha permitido atender más de 13 mil hectáreas agrícolas y evitar el uso de 272 toneladas de insecticidas sintéticos. Además, el Centro Nacional de Referencia de Control Biológico desarrolla estrategias para el manejo de plagas reglamentadas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Diversos estudios han demostrado que la introducción de enemigos naturales puede ser efectiva y proporcionar un control permanente de las especies plaga (Collinge *et al.*, 2022).

Zimmermann *et al.*, (2007) realizaron una revisión posicionando a *Beauveria* como uno de los hongos entomopatógenos más estudiados y empleados en programas de manejo integrado de plagas. Concluyendo que la eficacia de *B. bassiana* está estrechamente relacionada con factores ambientales, particularmente la temperatura, la humedad y la radiación solar, los cuales influyen en la germinación, crecimiento, esporulación y supervivencia de los conidios. En conjunto, estos antecedentes evidencian

el potencial del hongo como agente de control biológico y resaltan la importancia de continuar desarrollando estrategias que mejoren su producción y estabilidad, especialmente mediante sistemas controlados que permitan maximizar su eficiencia y viabilidad.

Beauveria bassiana

Es un hongo entomopatógeno de morfología filamentosa, cuyo micelio puede presentar tonalidades blancas o amarillentas. Está formado por una red de hifas septadas que le permite crecer, reproducirse y ejercer su acción sobre diversos insectos (Ramírez *et al.*, 2020). Pertenece a la clase *Ascomycetes*, puede infectar más de 200 especies de insectos, incluidas plagas de alta relevancia agrícola. Entre las que destacan la broca del café, palomilla del repollo, el picudo del plátano, entre otros (Monzón, 2002). Produce una amplia variedad de micotoxinas y enzimas (beauvericina, bassianina, bassianólido, beauverólidos, beauveriolidos, tenellina y oosporeína), capaces de matar o inhibir la actividad metabólica de los insectos.

Fermentación bifásica

La fermentación líquida presenta ventajas importantes: el inóculo líquido, constituido por blastosporas y micelio, comienza su crecimiento de manera inmediata, lo que acelera la producción de esporas durante la fase sólida. Asimismo, se reportó que el tiempo necesario para producir 1×10^{10} conidios por gramo de sustrato pudo reducirse a la mitad, hasta 148 horas, al incrementar la concentración de conidios de 1×10^6 a 5×10^7 conidios por gramo de sustrato seco en fermentaciones usando salvado de trigo como materia prima.

Subproductos agrícolas

La biomasa lignocelulósica es un tipo de biomasa vegetal caracterizada por estar formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, los tres biopolímeros que constituyen la estructura fundamental de las paredes celulares de las plantas (Morales, 2024). A través de la promoción de la economía circular, el avance de las fuentes de energía renovables y una agricultura sostenible, las políticas y estrategias globales comenzaron cambios sociales y económicos fundamentales para lograr la revolución verde y la transición ecológica (Lou *et al.*, 2024). Muchos investigadores se han centrado en la biovalorización de residuos con el fin de reducir los desechos y los problemas ambientales (Chilakamarthy *et al.*, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sustratos

Se recolectaron residuos agrícolas lignocelulósicos con potencial para su aprovechamiento biotecnológico. El pseudotallo de plátano, la cascarilla de arroz y las coronas de piña se obtuvieron a partir de residuos generados durante el procesamiento y aprovechamiento de los frutos.

Los sustratos se sometieron a secado en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante, y posteriormente se determinó el porcentaje de humedad de cada uno. Después, se realizó una trituración por cizallamiento utilizando una licuadora marca Oster con 1500 W de potencia. Finalmente, el material fue tamizado para obtener partículas con un tamaño entre 1 y 1.5 mm.

Caracterización proximal

Humedad

El contenido de humedad de los sustratos se determinó por secado en estufa de acuerdo con los métodos oficiales de la Asociación Americana de Químicos Cerealistas (AACC) por sus siglas en inglés (AACC, 2000). Las muestras fueron colocadas en cápsulas de cerámica previamente pesadas y sometidas a 100 °C $\pm$ 2°C durante 8 h en estufa de secado (marca BINDER, modelo FD-56) y se colocó 1 g de muestra en la cápsula con 3 réplicas. Finalizado el tiempo de secado, las muestras se enfriaron y pesaron nuevamente para calcular el porcentaje de humedad con base en la pérdida de masa.

Cenizas

La determinación de cenizas se realizó conforme a la metodología establecida en la Norma Mexicana NMX-F-607-NORMEX-2013. Inicialmente, los crisoles se secaron en estufa (marca BINDER, modelo FD-56) a 60 °C durante 5 días hasta llegar a peso constante; posteriormente, se enfriaron en un desecador y se registró el peso del crisol vacío.

Se colocó 1 g de muestra en cada crisol y se carbonizó lentamente sobre una parrilla hasta eliminar el desprendimiento de humo. Posteriormente, los crisoles se introdujeron en una mufla (marca WiseTherm modelo FH-14) a 550 $\pm$ 2 °C durante 4 h. Finalizada la incineración, los crisoles se colocaron en un desecador para determinar el peso final.

Proteínas

El método tradicional para esta determinación es el micro-Kjeldahl, el cual permite cuantificar el nitrógeno orgánico mediante digestión, destilación y titulación. Para evaluar el contenido de nitrógeno total en los sustratos sólidos y estimar la relación carbono/nitrógeno (C:N), se siguió la metodología establecida en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-155-SCFI-2012.

Determinación de azúcares totales mediante la técnica de DuBois

La cuantificación de azúcares totales se realizó mediante el método fenol-sulfúrico descrito por DuBois *et al.*, 1956 y adaptado para microplaca por Masuko *et al.*, 2005. La curva de calibración se preparó utilizando glucosa como estándar en un intervalo de concentración de 0–70 mg/L.

Se realizaron diferentes diluciones de los extractos hasta obtener valores de absorbancia dentro del intervalo de la curva de calibración de glucosa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

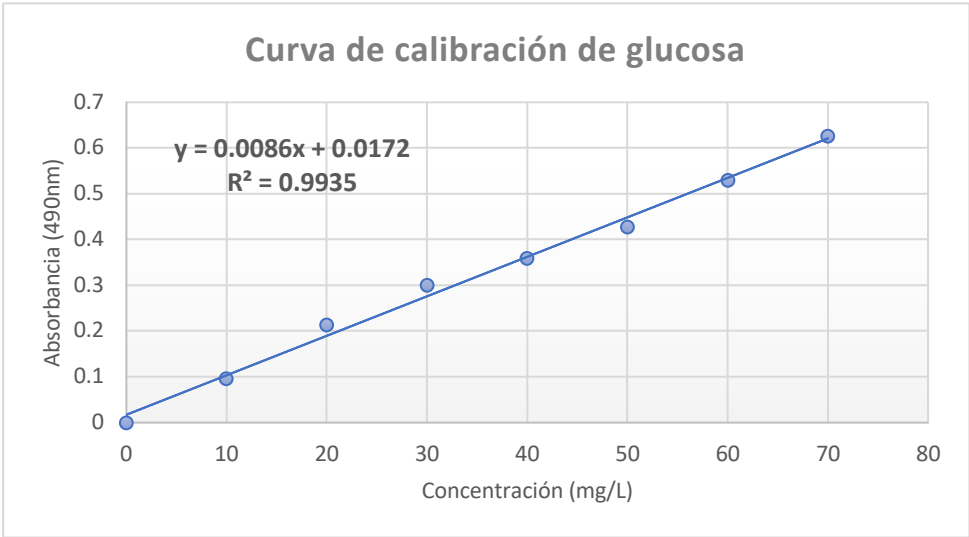
La caracterización proximal de los sustratos permitió identificar propiedades asociadas con su potencial de residuo biovalorizado en procesos de fermentación en estado sólido (Tabla 1).

Tabla 3 Análisis proximal de los sustratos base seca.

Sustrato	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteínas (%)
Cascarilla de arroz	8.18 ± 0.732	21.12 ± 0.163	3.45 ± 0.129
Corona de piña	5.66 ± 0.148	6.61 ± 0.3	0.17 ± 0.045
Pseudotallo de plátano	5.85 ± 0.409	16.14 ± 0.193	2.48 ± 0.157

La caracterización proximal de los sustratos mostró diferencias importantes, lo que podría influir en su desempeño en la fermentación en estado sólido. La cascarilla de arroz presentó el mayor contenido de cenizas (21.12%) lo cual puede asociarse con su elevado contenido de sílice, característica comúnmente reportada para este residuo lignocelulósico. Asimismo, este sustrato presentó el mayor contenido de proteínas (3.45%), lo que podría favorecer el crecimiento del hongo al aportar fuentes nitrogenadas durante la fermentación. En el caso de la corona de piña se estimó la menor concentración de proteínas (0.17%), debido a que este tipo de residuo lignocelulósico se caracteriza principalmente por su elevado contenido de fibra, celulosa y carbohidratos estructurales, así como por una baja proporción de compuestos nitrogenados.

Por último, la determinación de azúcares totales se validó con una curva de calibración de glucosa, presentada en la gráfica 1, en donde se obtuvo una $R^2 = 0.9935$.



Gráfica 1 Curva de calibración de glucosa.

El contenido de azúcares totales demostró que la corona de piña mostró la mayor concentración (30.61 %), seguida del pseudotallo de plátano (24.15 %) y la cascarilla de arroz (11.04 %). Estos resultados sugieren una mayor disponibilidad de fuentes de carbono fácilmente asimilables en la corona de piña y el pseudotallo de plátano. En contraste, la menor concentración observada en la cascarilla de arroz puede atribuirse a su elevada proporción de lignina y sílice, componentes que limitan la extracción y disponibilidad de carbohidratos fermentables. Este comportamiento coincide con reportes previos que

describen a la cascarilla de arroz como una biomasa lignocelulósica más recalcitrante en comparación con otros residuos agroindustriales.

RESULTADOS ESPERADOS Y PERSPECTIVAS

Resultados esperados y perspectivas

Las características fisicoquímicas de los residuos agroindustriales (proteínas, cenizas, humedad y carbohidratos) influyen directamente en el rendimiento y calidad de los conidios de *Beauveria bassiana* en fermentación en estado sólido (FES).

En 2015, Lopez-Perez *et al.* reportaron que la producción de conidios de *Beauveria bassiana* en cultivos sólidos alcanzó concentraciones de 10^9 – 10^{10} conidios/g de sustrato BS. Asimismo, Kang *et al.*, 2005 utilizaron paja de arroz y salvado de trigo en biorreactores de lecho empacado, obteniendo rendimientos superiores a 10^{10} conidios/g de sustrato base seca y señalaron que la aireación y la porosidad del sustrato son críticas para el proceso. En esa misma línea, Pham *et al.*, (2019) optimizaron la FES con arroz y cascarilla, confirmando que la humedad, temperatura y concentración de inóculo determinan la producción final de esporas.

CONCLUSIONES

En base a los resultados preliminares se puede establecer que el uso de pseudotallo de plátano, corona de piña y cascarilla de arroz representa una alternativa sostenible y de economía circular, debido a su contenido de materia orgánica, compuestos lignocelulósicos y nutrientes susceptibles de ser utilizados por *Beauveria bassiana*. Asimismo, las diferencias composicionales observadas entre los sustratos podrían influir directamente en la producción y calidad de los conidios obtenidos. Este trabajo establece las bases para optimizar mezclas de sustratos, escalar el proceso y evaluar la virulencia de los conidios obtenidos.

REFERENCIAS

- AACC International. (2000). *Approved methods of the American Association of Cereal Chemists* (10th ed.). AACC International.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Pandey, A., Singh, S., & Pillai, S. (2020). Biotechnological potential of *Beauveria bassiana* as a source of novel biocatalysts and metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(7), 1019–1034. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1805403>
- Ayaz, M., Li, C. H., Ali, Q., Zhao, W., Chi, Y. K., Shafiq, M., & Huang, W. K. (2023). Bacterial and fungal biological control agents for plant disease protection: From laboratory to field, current status,

challenges, and global perspectives. *Molecules*, 28(18), 6735.
<https://doi.org/10.3390/molecules28186735>

Chilakamarry, C. R., Sakinah, A. M. M., Zularisam, A. W., Sirohi, R., Khilji, I. A., Ahmad, N., & Pandey, A. (2022). Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, 343, 126065.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065>

Collinge, D. B., Jensen, D. F., Rabiey, M., Sarrocco, S., Shaw, M. W., & Shaw, R. H. (2022). Biological control of plant diseases—What has been achieved and what is the direction? *Plant Pathology*, 71(5), 1024–1047. <https://doi.org/10.1111/ppa.13555>

DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
<https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

Kang, S. W., Lee, S. H., Yoon, C. S., & Kim, S. W. (2005). Conidia production by *Beauveria bassiana* (for the biocontrol of a diamondback moth) during solid-state fermentation in a packed-bed bioreactor. *Biotechnology Letters*, 27(2), 135–139. <https://doi.org/10.1007/s10529-004-7871-8>

Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmaeel, Q., El Hamss, H., & Barka, E. A. (2022). Biological control of plant pathogens: A global perspective. *Microorganisms*, 10(3), 596.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>

Lopez-Perez, M., Rodriguez-Gomez, D., & Loera, O. (2015). Production of conidia of *Beauveria bassiana* in solid-state culture: Current status and future perspectives. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(3), 334–341. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.857293>

Lou, H., Luo, Q., Guo, Q., Su, R., Liu, J., He, H., & Cheng, Y. (2024). Optimization of *Beauveria bassiana* culture medium and spore production by response surface methodology. *Fermentation*, 10(11), 587. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110587>

Martí, A. S., Ferrer, A. S., Gómez, R. B., & Casacuberta, A. A. (2021). Producción de biopesticidas fúngicos: Una alternativa para la valorización de residuos agroindustriales. *IndustriAmbiente: Gestión Medioambiental y Energética*, 33, 24–30.

Masuko, T., Minami, A., Iwasaki, N., Majima, T., Nishimura, S. I., & Lee, Y. C. (2005). Carbohydrate analysis by a phenol–sulfuric acid method in microplate format. *Analytical Biochemistry*, 339(1), 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2004.12.001>

Monzón, A. (2002). *Producción, uso y control de calidad de hongos entomopatógenos en Nicaragua*. CATIE.

- Morales Mora, N. M. (2024). *Uso de biomasa residual de cascarilla de arroz (Oryza sativa), maíz (Zea mays) y bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) y su impacto en la conservación del medio ambiente* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Babahoyo.
- Núñez-Gaona, O., Saucedo-Castañeda, G., Alatorre-Rosas, R., & Loera, O. (2010). Effect of moisture content and inoculum on the growth and conidia production by *Beauveria bassiana* on wheat bran. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(4), 771–777. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132010000400004>
- Pham, T. A., Kim, J. J., & Kim, K. (2010). Optimization of solid-state fermentation for improved conidia production of *Beauveria bassiana* as a mycoinsecticide. *Mycobiology*, 38(2), 137–143. <https://doi.org/10.4489/MYCO.2010.38.2.137>
- Ramírez, H. G., Granja, A. Z., Aguila, E. T., & Cantoral, M. T. (2014). *Manual de producción y uso de hongos entomopatógenos*. Laboratorio de Entomopatógenos SCB-SENASA.
- Sala, A., Artola, A., Sánchez, A., & Barrena, R. (2020). Rice husk as a source for fungal biopesticide production by solid-state fermentation using *Beauveria bassiana* and *Trichoderma harzianum*. *Bioresource Technology*, 296, 122322. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122322>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019, 3 de diciembre). *México potencia en control biológico de plagas*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-potencia-en-control-biologico-de-plagas>
- Zimmermann, G. (2007). Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. *Biocontrol Science and Technology*, 17(6), 553–596. <https://doi.org/10.1080/09583150701309006>

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DE EXTRACTOS DEL RASTROJO DE AMARANTO

Juana Mora Rojas¹
 María de Jesús García Gómez²

RESUMEN

La caracterización de compuestos presentes en residuos agroindustriales es fundamental para su valorización. Se realizaron extractos acuosos y etanólicos a partir del rastrojo de amaranto; el residuo sólido fue sometido a hidrólisis en medio ácido, obteniéndose dos fracciones: fase polar (FP) y fase no polar (FNP). A todos los extractos se les determinó la actividad antioxidante mediante los ensayos DPPH y ABTS; y como un ensayo cualitativos determinaciones fitoquímicas y cromatografía en capa fina (TLC). Los resultados mostraron actividad antioxidante en todos los extractos. En el ensayo DPPH, el extracto acuoso presentó un porcentaje de inhibición de $(60.816 \pm 0.607\%)$, seguido del extracto etanólico $(80.763 \pm 0.228\%)$, la fase polar $(52.394 \pm 0.646\%)$ y la fase no polar $(40.913 \pm 0.444\%)$. En el ensayo ABTS, los valores fueron: extracto acuoso $(75.831 \pm 0.031\%)$, extracto etanólico $(74.831 \pm 0.006\%)$, fase polar $(14.264 \pm 0.023\%)$ y fase no polar $(13.183 \pm 0.004\%)$. Confirmados por los ensayos fitoquímicos y cromatografía en capa fina (TLC) para los extractos etanólico, FP y FNP, mientras que en el extracto acuoso no se determinó su presencia. Los resultados confirman el potencial del rastrojo de amaranto como fuente de compuestos antioxidantes y resaltan la importancia de emplear estrategias de extracción combinadas para su recuperación.

Palabras clave: *Rastrojo de amaranto, compuestos fenólicos, actividad antioxidante, hidrólisis ácida, cromatografía en capa fina.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ha cobrado relevancia como estrategia para reducir el impacto ambiental y promover el uso sustentable de los recursos. El incremento de la producción agrícola genera grandes cantidades de subproductos vegetales que, en muchos casos, son desechados o destinados a usos de bajo valor, representando tanto un problema ambiental como una oportunidad de valorización (Sarangi *et al.*, 2023).

¹ Universidad del Papaloapan. juanitarojas320@gmail.com

² Universidad del Papaloapan. unpal7@gmail.com

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) es un cultivo de importancia nutricional y económica en México; sin embargo, el aprovechamiento de sus residuos ha sido escasamente estudiado. El rastrojo de amaranto constituye una fracción importante de la biomasa residual generada durante su producción y podría representar una fuente potencial de compuestos bioactivos (Hadidi *et al.*, 2024). Diversos residuos lignocelulósicos contienen compuestos fenólicos con actividad antioxidante asociados a la pared celular vegetal. La disponibilidad de estos compuestos depende de la estructura de la matriz lignocelulósica y de las interacciones químicas que los retienen (Pandey *et al.*, 2000). Por ello, resulta necesario evaluar estrategias de extracción que permitan su recuperación eficiente. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial del rastrojo de amaranto como fuente de compuestos fenólicos con actividad antioxidante mediante métodos de extracción fisicoquímica, contribuyendo a su valorización y aprovechamiento sustentable.

MARCO TEÓRICO

Amaranto

El amaranto es considerado un pseudocereal debido a la producción de granos con características similares a las de los cereales convencionales. Se caracteriza por su capacidad de adaptación a condiciones adversas, como sequía y suelos de baja fertilidad, lo que favorece su cultivo en distintas regiones de México, entre ellas Oaxaca, Puebla y Tlaxcala. Además de su importancia alimentaria, especies como *Amaranthus hypochondriacus* han despertado interés por su contenido de compuestos bioactivos presentes en hojas y tallos (Soriano-García & Aguirre-Díaz, 2019).

Material lignocelulósico y despolimerización de lignina

El rastrojo de amaranto es un material lignocelulósico compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos biopolímeros forman estructuras complejas que dificultan la liberación de compuestos fenólicos asociados a la pared celular (Vegas *et al.*, 2004). Para favorecer la obtención de estos compuestos se emplean procesos de despolimerización de lignina, tanto biológicos como químicos. Entre los métodos químicos destaca la acidólisis, la cual rompe enlaces característicos de la lignina, especialmente β -O-4, permitiendo liberar compuestos aromáticos de menor peso molecular y mayor solubilidad (Chávez-Sifontes & Domine, 2013).

Actividad antioxidante y caracterización fitoquímica

Los antioxidantes son compuestos capaces de inhibir o retardar procesos de oxidación mediante la neutralización de radicales libres (Nimse & Pal, 2015). Los compuestos fenólicos de origen vegetal representan una importante fuente de antioxidantes con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. La actividad antioxidante puede evaluarse mediante ensayos basados en transferencia de electrones (ET) o transferencia de átomos de hidrógeno (HAT). Entre los métodos

más utilizados destacan DPPH y ABTS, ampliamente empleados para determinar la capacidad antioxidante de extractos vegetales (Huang *et al.*, 2005).

Además de evaluar la capacidad antioxidante, es importante realizar una caracterización preliminar de los compuestos presentes en los extractos, ya que los metabolitos fenólicos y flavonoides suelen estar relacionados con dicha actividad biológica. Para ello, pueden emplearse ensayos fitoquímicos cualitativos, los cuales permiten identificar metabolitos secundarios mediante cambios de color o formación de precipitados (Salim *et al.*, 2022). Entre las pruebas más utilizadas se encuentran cloruro férrico y Acetato de plomo. Asimismo, la cromatografía en capa fina (TLC) es una técnica rápida y de bajo costo utilizada para separar e identificar compuestos presentes en mezclas complejas, con base en su afinidad hacia una fase estacionaria y una fase móvil (Kowalska & Sajewicz, 2022).

ANTECEDENTES

En los últimos años, los residuos agroindustriales lignocelulósicos han sido ampliamente estudiados como fuentes sostenibles de compuestos fenólicos y otros metabolitos con actividad antioxidante, debido a su abundancia y bajo costo. Estos compuestos pueden encontrarse en forma libre o asociados a la matriz estructural, por lo que se han desarrollado estrategias como la hidrólisis ácida, extracción con solventes y tratamientos enzimáticos para mejorar su recuperación (Pandey *et al.*, 2000). Dentro de este contexto, distintas especies del género *Amaranthus* han demostrado ser una fuente importante de compuestos fenólicos, incluyendo ácidos fenólicos y flavonoides, presentes en hojas, semillas y flores, con actividad antioxidante significativa (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010).

En particular, el rastrojo de amaranto ha comenzado a destacar como un residuo con potencial funcional, ya que contiene compuestos bioactivos y puede generar péptidos antioxidantes mediante hidrólisis (Hipólito-Nolasco *et al.*, 2022). Estudios previos han demostrado que, mediante extracción acuosa e hidrólisis ácida, es posible obtener compuestos fenólicos con actividad antioxidante, siendo la hidrólisis clave para liberar aquellos asociados a la matriz lignocelulósica (Arce Vázquez, 2011). No obstante, aún existe limitada información sobre su aprovechamiento integral, especialmente en la optimización de métodos de extracción y caracterización de compuestos, así como en la influencia de factores como la etapa de crecimiento. Por ello, el rastrojo de amaranto representa una alternativa prometedora que requiere mayor investigación para su valorización (Karamać *et al.*, 2020).

JUSTIFICACIÓN

El rastrojo de amaranto representa un residuo agroindustrial con potencial para la obtención de compuestos antioxidantes mediante procesos fisicoquímicos. Aunque la extracción sólido-líquido

permite recuperar algunos metabolitos bioactivos, gran parte de los compuestos fenólicos permanece asociada a la matriz lignocelulósica.

La recuperación de antioxidantes a partir de este residuo permitiría no solo disminuir problemas asociados a su acumulación, sino también generar productos de valor agregado con posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica.

HIPÓTESIS

El rastrojo de amaranto contiene compuestos libres y asociados a los carbohidratos, que pueden ser extraídos mediante métodos físico-químicos (extracción acuosa e hidrólisis ácida), con actividad antioxidante que podrían tener diversas aplicaciones.

OBJETIVO

Realizar la extracción físico-química de compuestos biofuncionales con actividad antioxidante a partir del rastrojo de amaranto.

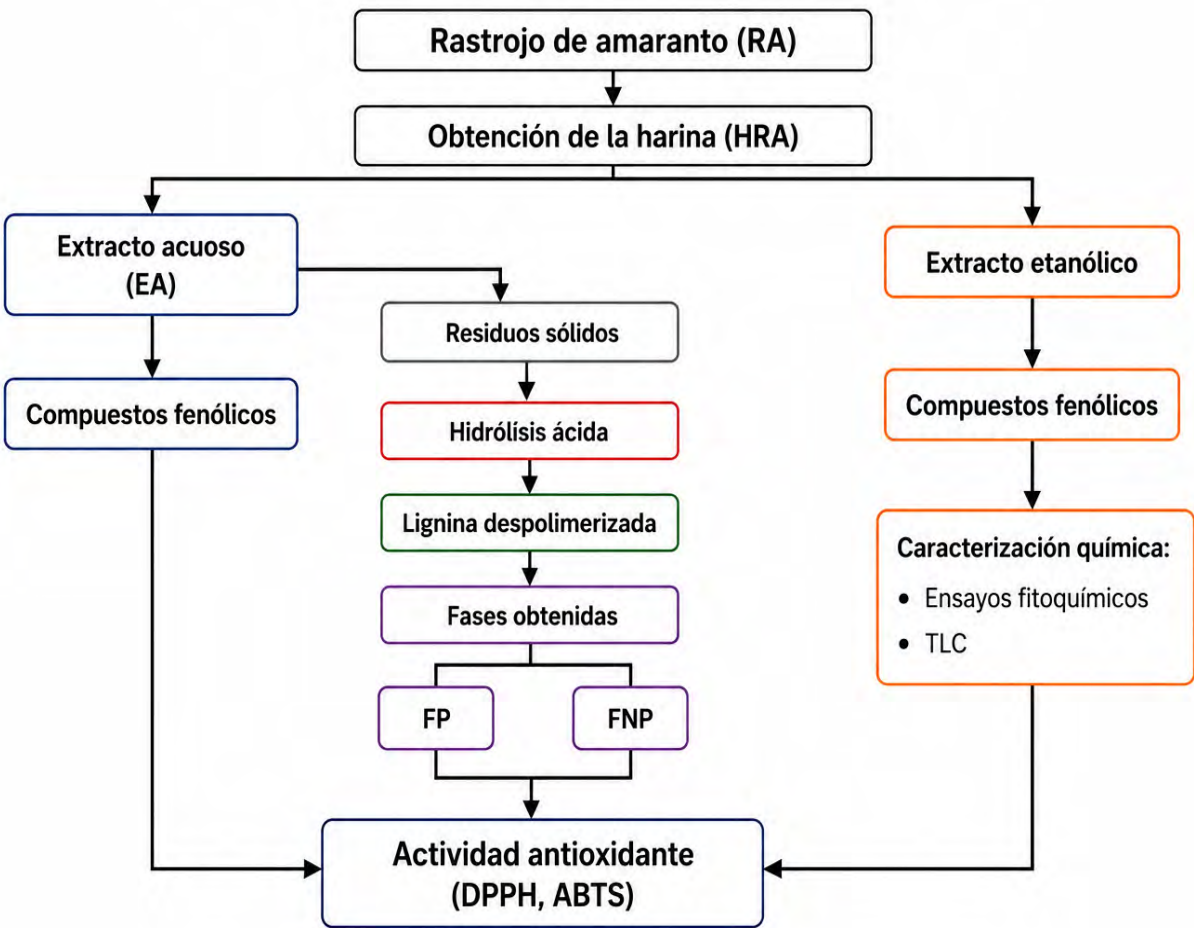
MATERIALES Y MÉTODOS

El rastrojo de amaranto se recolectó en parcelas ubicadas en el municipio Zimatlán de Álvarez en el estado de Oaxaca, México. La recolección se realizó posterior al proceso de trillado del cultivo, considerando hojas y tallos de la planta. Fue secado a temperatura ambiente, sometido a molienda y tamizado para obtener una harina homogénea. A partir de este material se realizaron extracciones mediante métodos fisicoquímicos, incluyendo extracción acuosa, etanólica y un tratamiento de hidrólisis ácida para la obtención de compuestos bioactivos.

La actividad antioxidante de los extractos se evaluó mediante los ensayos DPPH y ABTS, basados en la capacidad de los compuestos para neutralizar radicales libres.

Adicionalmente, se realizaron ensayos fitoquímicos cualitativos para la detección de metabolitos secundarios y cromatografía en capa fina (TLC) para el análisis del perfil de compuestos presentes en los extractos.

Diagrama experimental



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de la capacidad antioxidante de los extractos

Capacidad de reducción del radical 2,2-difenol-1-picrilhidrazil (DPPH•)

Tabla 1. Porcentaje de reducción del radical DPPH•

Muestra	% inhibición DPPH•	mg TE/mL
Extracto acuoso (EA)	60.816±0.607 ^b	2.587±0.017 ^c
Extracto etanólico	80.763±0.228 ^a	27.564±0.279 ^a
Residuo sólido del EA (FP)	52.394±0.646 ^c	17.779±0.138 ^b
Residuo sólido del EA (FNP)	40.913±0.444 ^d	1.379±0.018 ^d

mg TE/mL= equivalentes de Trolox. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar (n = 3). Letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0.05).

Los resultados del ensayo DPPH evidenciaron diferencias significativas en la actividad antioxidante de las muestras, confirmando que la polaridad del solvente influye en la extracción de compuestos antioxidantes. El extracto etanólico presentó la mayor capacidad antioxidante, en concordancia con lo reportado por Dai y Mumper (2010) y (Do *et al.*, 2014), quienes destacan la eficiencia de los solventes alcohólicos para extraer compuestos fenólicos y flavonoides. Asimismo, estudios en especies del

género *Amaranthus* realizados por (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010) y (Martínez-López *et al.*, 2020) reportan mayor actividad antioxidante en extractos etanólicos que en acuosos. El extracto acuoso y el residuo sólido del EA (FP) mostraron una actividad intermedia, similar a lo descrito por (Gorinstein *et al.*, 2001) para extractos acuosos de amaranto. Por otro lado, el residuo sólido del EA (FNP) presentó la menor actividad antioxidante, coincidiendo con Shahidi y Zhong (2015), quienes señalan la limitada contribución de compuestos no polares en ensayos DPPH. En conjunto, los resultados indican que la actividad antioxidante del rastrojo de amaranto está asociada principalmente a compuestos de naturaleza polar y semipolar.

Reducción del radical catiónico ABTS

Tabla 2. % de inhibición del radical ABTS-persulfato en *Amaranthus hypochondriacus*.

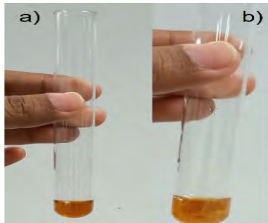
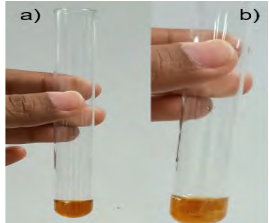
Muestra	%Inhibición ABTS	mg TE/mL
Extracto acuoso (EA)	75.831±0.031 ^a	4.321±0.059 ^d
Extracto etanólico	74.831±0.006 ^b	36.331±0.105 ^b
Residuo sólido del EA (FP)	14.264±0.023 ^c	122.064±0.019 ^a
Residuo sólido del EA (FNP)	13.183±0.004 ^d	24.719±0.132 ^c

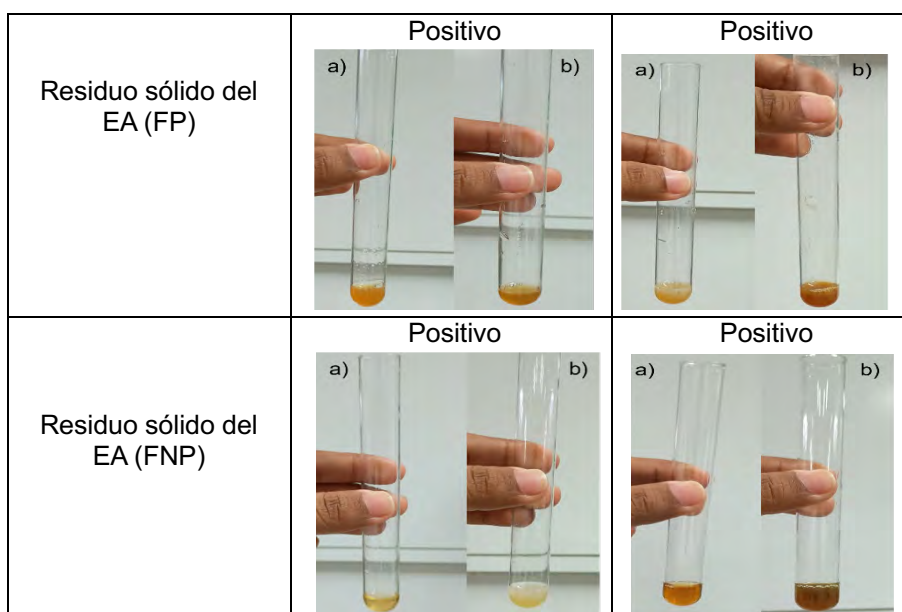
mg TE/mL= equivalentes de Trolox. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar (n = 3). Letras diferentes indican diferencias significativas (p < 0.05).

Los resultados del ensayo ABTS•⁺ mostraron diferencias significativas en la capacidad antioxidante de las muestras, evidenciando la influencia del tipo de extracción en la neutralización del radical. El extracto acuoso y el extracto etanólico presentaron los mayores porcentajes de inhibición, indicando la presencia de compuestos antioxidantes hidrofílicos y semipolares en el rastrojo de amaranto. Estos resultados coinciden con lo reportado por (Re *et al.*, 1999) y (Floegel *et al.*, 2011), quienes destacan la sensibilidad del método ABTS a compuestos fenólicos de bajo peso molecular. El residuo sólido del EA (FP) mostró actividad antioxidante intermedia, mientras que el residuo sólido del EA (FNP) presentó la menor inhibición del radical, sugiriendo una baja contribución de compuestos apolares, en concordancia con estudios en *Amaranthus* reportados por (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010) y (Martínez-López *et al.*, 2020). En conjunto, los resultados confirman que la capacidad antioxidante del rastrojo de amaranto se asocia principalmente a compuestos hidrofílicos y semipolares.

Análisis fitoquímico de las muestras

Tabla 3. Resultados de las pruebas fitoquímicas realizada a los extractos

Extracto	Acetato de plomo Positivo	Cloruro férrico Positivo
Etanólico		



a) Extracto antes de la adición de los reactivos (cloruro férrico y acetato de plomo); b) extracto después de la adición de los reactivos

Extracto etanólico:

La reacción positiva se debe a que el acetato de plomo reacciona con compuestos fenólicos, principalmente taninos y flavonoides (Saeed *et al.*, 2012), formando complejos insolubles (sales de plomo) que precipitan. Por lo tanto, la aparición del precipitado indica un resultado positivo para la presencia de compuestos fenólicos en el extracto acuoso.

La adición de cloruro férrico al extracto etanólico produjo un ligero oscurecimiento de la solución, indicando la presencia de compuestos fenólicos en baja concentración (Panche *et al.*, 2016).

Residuo sólido del EA (FP):

La adición de acetato de plomo a la fase polar produjo la formación de un precipitado visible en el fondo del tubo, indicando una reacción positiva para compuestos fenólicos. Este resultado sugiere la presencia de taninos y/o flavonoides en la fracción polar del extracto (Khan *et al.*, 2021).

El ensayo cualitativo con cloruro férrico realizado sobre la fase polar mostró un cambio de color de amarillo claro a marrón oscuro tras la adición del reactivo, lo cual indica una reacción positiva para compuestos fenólicos. Este resultado sugiere la presencia de fenoles y polifenoles en el extracto, los cuales forman complejos coloreados con el ion Fe^{3+} Banu y Cathrine, (2015).

Residuo sólido del EA (FNP):

El ensayo con acetato de plomo mostró la formación de un precipitado tras la adición del reactivo, lo que indica un resultado positivo y sugiere la presencia de taninos o compuestos fenólicos en la fase no polar. De acuerdo con la literatura (Sasidharan *et al.*, 2011), este reactivo forma complejos insolubles con metabolitos fenólicos, particularmente taninos, permitiendo su detección cualitativa. La

presencia de estos compuestos en una fase no polar puede atribuirse a la coexistencia de fenoles menos polares o a fenómenos de arrastre Dai y Mumper, (2010).

El oscurecimiento marcado tras la adición de cloruro férrico indica una reacción positiva al ensayo de cloruro férrico. Esto sugiere la presencia de compuestos fenólicos, ya que:

El Fe^{3+} forma complejos coloreados con los grupos hidroxilo fenólicos. Tonalidades café oscuro/verde parduzco son típicas cuando hay fenoles y/o taninos, especialmente en extractos vegetales complejos (Sasidharan *et al.*, 2011).

Además del análisis por RMN y los ensayos fitoquímicos, se realizó cromatografía en capa fina (TLC) para el extracto etanólico, empleando cloruro férrico como reactivo revelador.

RESULTADOS DE LA TLC

El análisis por TLC se realizó como un ensayo cualitativo, permitiendo identificar la presencia y características de los compuestos en las muestras.

Tabla 4. Resultados de cromatografía en capa fina (TLC)

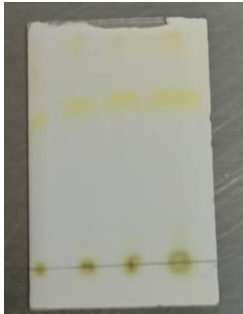
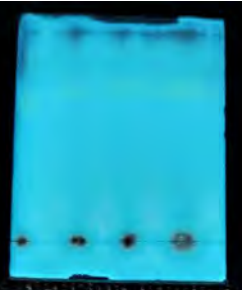
	Figura 1. Muestras sin revelador Los compuestos son poco coloreados, y por la baja migración son polares con el sistema metanol: agua
	Figura 2. Luz UV a 365 nm Se observan más las manchas, los compuestos interactúan a esta intensidad de luz típico de fenoles y flavonoides.
	Figura 3. Luz UV 264 nm Los compuestos no absorbieron luz a 264 nm



Figura 4. Revelador con cloruro férrico
Se observan manchas verdinegras confirmando presencia de grupos fenólicos.

La TLC confirmó que el extracto etanólico si contiene compuestos fenólicos

CONCLUSIONES

Se comprobó que el rastrojo de amaranto constituye una fuente viable de compuestos fenólicos con actividad antioxidante. La aplicación de estrategias de extracción complementarias permitió cuantificar antioxidantes tanto libres como ligados a la matriz lignocelulósica, confirmando la hipótesis planteada. Los ensayos DPPH y ABTS evidenciaron la capacidad antioxidante en los extractos, mientras que las pruebas fitoquímicas y TLC respaldaron la presencia de estructuras fenólicas.

Este trabajo demuestra el potencial de valorización de un residuo agroindustrial abundante mediante la obtención de compuestos bioactivos de interés, y sienta bases para futuros estudios de optimización, purificación e identificación específica de metabolitos, con posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica.

REFERENCIAS

- Adusei, S., Otchere, J. K., Oteng, P., Mensah, R. Q., & Tei-Mensah, E. (2019). Phytochemical analysis, antioxidant and metal chelating capacity of *Tetrapleura tetraptera*. *Heliyon*, 5(11), e02762.
- Alvarez-Jubete, L., Wijngaard, H., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa, buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking. *Food Chemistry*, 119(2), 770–778.
- Arce Vázquez, M. B. (2011). *Obtención de compuestos biofuncionales a partir del material lignocelulósico de Amaranthus hypochondriacus L.* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa]. Repositorio Institucional BINDANI.
- Baltierra-Trejo, E., Márquez-Benavides, L., Hernández-Berriel, M. del C., & Sánchez-Yáñez, J. M. (2015). Generación de monómeros aromáticos por *Aspergillus* y *Penicillium* spp. a partir de lignina residual de paja de trigo. *Vitae*, 22(3), 197–204.
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76.

- Björkman, A. (2002). Lignin and lignin-carbohydrate complexes. *Industrial & Engineering Chemistry*, 49(9), 1395–1398.
- 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.
- Chávez Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15–46.
- Coronado, M., Vega, S., Gutiérrez, R., Vázquez, M., & Radilla, C. (2015). Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. *Revista Chilena de Nutrición*, 42(2), 206–212.
- Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313–7352.
- Do, Q. D., et al. (2014). Effect of extraction solvent on phenolic content and antioxidant activity. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22(3), 296–302.
- Floegel, A., et al. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(7), 1043–1048.
- Gorinstein, S., et al. (2001). Characterization of amaranth proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(11), 5595–5601.
- Hadidi, M., Aghababaei, F., Mahfouzi, M., Zhang, W., & McClements, D. J. (2024). Amaranth proteins: From extraction to application as nanoparticle-based delivery systems for bioactive compounds. *Food Chemistry*, 439.
- Hipólito-Nolasco, C., Ramírez-Isidro, O., Núñez-Gaona, O., Ávila-Alejandre, A. X., Hernández-López, A., & García-Gómez, M. de J. (2022). Antioxidant activity of peptides obtained by enzymatic hydrolysis from proteins of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) stubble. *Agrociencia*.
- Huang, D., Boxin, O. U., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 1841–1856.
- Karamać, M., Gai, F., & Peiretti, P. G. (2020). Effect of the growth stage of false flax (camelina sativa L.) on the phenolic compound content and antioxidant potential of the aerial part of the plant. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 70(2), 189–198.
- Khan, M. R., Sahreen, S., & Khan, R. A. (2021). Phytochemical screening, antioxidant, and antibacterial activities of different extracts of *Rumex hastatus* D. Don. *Journal of Food Biochemistry*, 45(8), e13830.
- Kowalska, T., & Sajewicz, M. (2022). Thin-layer chromatography (TLC) in the screening of botanicals: Its versatile potential and selected applications. *Molecules*, 27(19), 6607.

- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *American Journal Of Clinical Nutrition*, 79(5), 727-747.
- Martínez-López, A., Millán-Linares, M. C., Rodríguez-Martín, N. M., Millán, F., & Montserrat-de la Paz, S. (2020). Nutraceutical value of kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). *Journal of Functional Foods*, 65.
- Nimse, S. B., & Pal, D. (2015). Free radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC Advances*, 5(35), 27986–28006.
- Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4619–4626.
- Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., & Soccol, V. T. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residues: I. Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 74(1), 69–80.
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*, 5, e47.
- Pulido, R., Bravo, L., & Saura-Calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3396–3402.
- 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.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., & Mattila, P. H. (2010a). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120(1), 128–133.
- Salim, M., Saeed, A., Iqbal, M., Khan, B. A., Khan, N., Rabbani, I., Alsenani, F., & Rasul, A. (2022). Phytochemical screening and evaluation of antioxidant, total phenolic and flavonoid contents in various weed plants associated with wheat crops. *Brazilian Journal of Biology*, 82, e256486.
- Saeed, N., Khan, M. R., & Shabbir, M. (2012). Antioxidant activity, total phenolic and total flavonoid contents of whole plant extracts of *Torilis leptophylla* L. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 12, 221.
- Santiago, M., & Strobel, S. (2013). Thin-layer chromatography. En *Methods in Enzymology* (Vol. 533, pp. 303–324).

- Sarangi, P. K., Vivekanand, V., Mohanakrishna, G., Pattnaik, B., Muddapur, U. M., & Aminabhavi, T. M. (2023). Production of bioactive phenolic compounds from agricultural by-products towards bioeconomic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137460.
- Sasidharan, S., Chen, Y., Saravanan, D., Sundram, K. M., & Yoga Latha, L. (2011). Extraction, isolation and characterization of bioactive compounds from plant extracts. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 8(1), 1–10.
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2015). Measurement of antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 18, 757–781.
- Sharma, V., & Janmeda, P. (2017). Extraction, isolation and identification of flavonoid from *Euphorbia neriifolia* leaves. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(4), 509–514.
- Soriano-García, M., & Saraid Aguirre-Díaz, I. (2020). Nutritional functional value and therapeutic utilization of amaranth. In V. Y. Waisundara (Ed.), *Nutritional Value of Amaranth*. IntechOpen.
- Tanis, M. H., Wallberg, O., Galbe, M., & Al-Rudainy, B. (2023). Lignin Extraction by Using Two-Step Fractionation: A Review. *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 98, 29(1), 98.
- Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T., Mazur, M., & Telser, J. (2006). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal Of Biochemistry & Cell Biology*, 39 (1), 44-84.
- Vegas, R., Alonso, J. L., Domínguez, H., & Parajó, J. C. (2004). Processing of rice husk autohydrolysis liquors for obtaining food ingredients. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(24), 7311–7317.
- Wayner, D. D. M., Burton, G. W., Ingold, K. U., & Locke, S. (1985). Quantitative measurement of the total, peroxy radical-trapping antioxidant capability of human blood plasma by controlled peroxidation. *FEBS Letters*, 187(1), 33–37.
- Zehiroglu, C., & Ozturk Sarikaya, S. B. (2019). The importance of antioxidants and place in today's scientific and technological studies. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 4757–4774.

EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE XILANASAS FÚNGICAS POR FERMENTACIÓN SÓLIDA DE RASTROJO DE AMARANTO

José Alfredo Garcidueñas Paz¹

Jesús Carillo Ahumada²

María de Jesús García Gómez³

RESUMEN

La valorización de residuos lignocelulósicos mediante fermentación en estado sólido (FES) representa una estrategia sostenible para la producción de enzimas industriales. En este estudio se evaluó el efecto del tamaño de partícula sobre la producción de xilanasas fúngicas utilizando *Aspergillus oryzae* en rastrojo de amaranto. Las fermentaciones se realizaron durante 15 días a 28 °C, pH 4.5 y 50% de humedad, empleando tamaños de partícula de 1.0 y 1.4 mm, con monitoreo cada 72 h de pH, humedad, biomasa, actividad xilanólítica (DNS). La producción de xilanasas alcanzó la mayor producción de xilanasas (7.713 U/g de rastrojo) en menor tiempo (6 días) con un tamaño de partícula de 1.4 mm, siendo 1.6 veces mayor que la obtenida en el sistema de 1.0 mm en el mismo tiempo. El análisis mediante gráficos de contorno permitió identificar una región de mayor actividad xilanólítica en tiempos intermedios (6-9 días) de fermentación asociados al tamaño de partícula de 1.4 mm. Estos resultados evidencian un desacoplamiento entre el crecimiento fúngico y la producción enzimática, consistente con lo reportado por Teigisiserova *et al.*, (2021) en FES, donde la síntesis de enzimas hidrolíticas está regulada por condiciones fisiológicas y del proceso más que por el crecimiento celular máximo.

Palabras clave: *rastrojo de amaranto, fermentación sólida, Aspergillus oryzae, xilanasas.*

INTRODUCCIÓN

La biomasa lignocelulósica constituye uno de los recursos renovables más abundantes a nivel mundial y representa una alternativa sostenible para el desarrollo de bioprocesos destinados a la obtención de productos de valor agregado. Los residuos agrícolas contienen cantidades importantes de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes estructurales que pueden transformarse mediante procesos biotecnológicos en enzimas, biocombustibles y otros bioproductos de interés industrial. En este contexto, la fermentación en estado sólido (FES) se ha consolidado como una tecnología eficiente

¹ Universidad del Papaloapan. jagarciduenaspaz@gmail.com

² Universidad del Papaloapan. jesuscarillo18@yahoo.com

³ Universidad del Papaloapan. unpal7@gmail.com

para el aprovechamiento de estos materiales, debido a su bajo consumo de agua, menor generación de efluentes y elevada productividad enzimática (Perwez *et al.*, 2024; Erismann *et al.*, 2025).

La hemicelulosa representa entre el 20 y el 35 % de la biomasa lignocelulósica vegetal y está constituida principalmente por xilanos. Su degradación requiere la acción de las xilanasas (EC 3.2.1.8), enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces β -1,4-xilosídicos y que poseen aplicaciones en las industrias papelera, alimentaria, textil, farmacéutica, de alimentos para animales y de biocombustibles. Debido a ello, la producción microbiana de xilanasas ha cobrado gran interés, particularmente mediante hongos filamentosos como *Aspergillus oryzae*, reconocido por su elevada capacidad secretora de enzimas extracelulares, su adaptación a sistemas de fermentación en estado sólido y su amplio uso en procesos biotecnológicos (Bhardwaj *et al.*, 2023; Shinkawa & Mitsuzawa, 2020; Sun *et al.*, 2024).

La eficiencia de la FES depende de diversos factores físicos y operacionales, entre los que destacan la composición del sustrato, el contenido de humedad, la temperatura, la densidad del inóculo y el tamaño de partícula. Este último modifica la porosidad del lecho fermentativo, la transferencia de oxígeno, la retención de humedad y la superficie disponible para la colonización microbiana, afectando tanto el crecimiento del hongo como la producción de enzimas extracelulares (Singhania *et al.*, 2022; Perwez *et al.*, 2024).

México es uno de los principales centros de origen y diversificación del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.), cultivo cuya producción genera cantidades importantes de rastrojo constituido por tallos y hojas con elevado contenido lignocelulósico. Aunque este residuo posee potencial para ser aprovechado como sustrato en procesos fermentativos, su utilización para la producción de xilanasas ha sido poco estudiada. En particular, existe información limitada acerca del efecto del tamaño de partícula del rastrojo de amaranto sobre la producción simultánea de biomasa y actividad xilanólítica por *A. oryzae* en fermentación en estado sólido (SIAP, 2024; Erismann *et al.*, 2025).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del tamaño de partícula de harina de rastrojo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) sobre la producción de biomasa y actividad xilanólítica por *Aspergillus oryzae* mediante fermentación en estado sólido, así como identificar, mediante gráficos de contorno, las regiones de mayor respuesta biológica asociadas al tiempo de fermentación y al tamaño de partícula del sustrato.

MATERIALES Y METODOS

Preparación del sustrato. El rastrojo de amaranto (*A. hypochondriacus*) fue recolectado en parcelas agrícolas localizadas en el municipio de Zimatlán de Álvarez, Oaxaca, México (16°51'58"N, 96°47'06"W), después del proceso de cosecha. El material vegetal, constituido por hojas y tallos, fue

secado al sol y posteriormente sometido a secado en estufa a 60 °C durante 24 h. Una vez seco, el material se trituró empleando una licuadora industrial de acero inoxidable (Tapisa®, modelo T12L, 1.5 HP) y se tamizó utilizando tamices Tyler® No. 18 (abertura de 1.0 mm) y No. 14 (abertura de 1.4 mm), obteniéndose las fracciones de tamaño de partícula utilizadas en los ensayos de fermentación en estado sólido. La harina de rastrojo de amaranto se almacenó en bolsas herméticas hasta su utilización.

Microorganismo. Se utilizó la cepa fúngica *A. oryzae* ATCC® 10124™ (Microbiologics®, Kwik-Stik™, EUA), conservada bajo refrigeración a 4 °C hasta su utilización en los experimentos. La cepa fue reactivada en medio agar papa dextrosa (PDA) previamente esterilizado a 121 °C durante 15 min e incubada a 28 °C para favorecer el crecimiento micelial y la esporulación.

Propagación y obtención de esporas. La propagación del microorganismo se realizó mediante cultivo en medio PDA incubado a 28 °C durante 7 días, hasta observar abundante formación de conidios. Las esporas se recuperaron adicionando 20 mL de Tween® 80 al 0.1 % (v/v) sobre la superficie del cultivo. Posteriormente, la suspensión fue sometida a agitación para facilitar el desprendimiento y dispersión homogénea de los conidios.

Preparación del inóculo. La suspensión de esporas de *A. oryzae* se obtuvo mediante la adición de 20 mL de Tween 80 al 0.1 % (v/v) estéril sobre el cultivo esporulado. La concentración de esporas se determinó mediante conteo directo en una cámara de Neubauer. Para ello, la suspensión obtenida se diluyó 1:10 empleando agua destilada estéril y se homogenizó mediante agitación en vórtex durante 5 min. Posteriormente, se colocaron 100 µL de la dilución en la cámara de Neubauer y se realizó el conteo microscópico a 40×. La concentración de esporas por mililitro se calculó mediante la siguiente ecuación: $\text{Concentración (esporas / mL)} = N \times FD \times 10^4 / n$. Donde: (N) corresponde al número total de esporas contadas, (FD) al factor de dilución y (n) al número de cuadros contabilizados. Con base en la concentración obtenida, la suspensión fue ajustada para alcanzar una concentración final de 1×10^7 esporas / g de sustrato, la cual se empleó como inóculo en los ensayos de fermentación en estado sólido.

Fermentación en estado sólido. La FES se realizó utilizando harina de rastrojo de amaranto (HRA) como sustrato. Se evaluaron dos tamaños de partícula: 1.0 mm (Experimento 1) y 1.4 mm (Experimento 2). Para cada tratamiento se colocaron 10 g de HRA en matraces Erlenmeyer de 250 mL previamente esterilizados. El sustrato fue esterilizado en autoclave a 121 °C durante 15 min. Posteriormente, se adicionaron 10 mL de una solución amortiguadora de acetatos 1 M que contenía el inóculo fúngico. La inoculación se realizó a una concentración de 1×10^7 esporas por gramo de sustrato seco, empleando una suspensión de esporas de *A. oryzae* previamente ajustada mediante conteo en cámara de Neubauer. La humedad inicial del sistema se ajustó al 50 %, valor determinado

experimentalmente mediante termobalanza. Los matraces inoculados se incubaron a 28 °C durante 15 días. Cada tratamiento se realizó por triplicado y se efectuaron muestreos cada 72 h (0, 3, 6, 9, 12 y 15 días) para evaluar los cambios en pH, humedad, biomasa fúngica y actividad xilanolítica. Las condiciones de temperatura, pH inicial y humedad se mantuvieron constantes para ambos tratamientos, siendo el tamaño de partícula la variable de estudio para determinar su efecto sobre la producción de xilanasas por *A. oryzae*.

Determinación de humedad. La humedad del sistema fermentativo se determinó cada 72 h durante el proceso de fermentación (días 0, 3, 6, 9, 12 y 15). Para ello, se tomó una muestra de 1 g de sustrato fermentado directamente del matraz de fermentación utilizando una espátula estéril. El contenido de humedad se cuantificó mediante análisis termogravimétrico empleando una termobalanza operada a 120 °C. El porcentaje de humedad se calculó a partir de la pérdida de masa registrada durante el proceso de secado, siguiendo el principio gravimétrico utilizado para la determinación de humedad en materiales lignocelulósicos reportado por la AOAC (2019). Las determinaciones se realizaron por triplicado para cada tiempo de muestreo y tratamiento evaluado.

Determinación de pH. El pH del sistema fermentativo se determinó cada 72 h durante el proceso de fermentación (días 0, 3, 6, 9, 12 y 15). Para ello, se tomó una muestra de 1 g de sustrato fermentado y se suspendió en 10 mL de agua destilada estéril, obteniendo una relación sólido líquido de 1:10 (p/v). La suspensión se transfirió a tubos cónicos de 50 mL y se centrifugó a 10 000 rpm durante 15 min para separar la fase sólida del sobrenadante. Posteriormente, el pH se determinó en el extracto acuoso obtenido mediante un potenciómetro previamente calibrado. Las determinaciones se realizaron por triplicado para cada tratamiento y tiempo de muestreo. La metodología empleada se basó en procedimientos ampliamente utilizados para la evaluación de parámetros fisicoquímicos en fermentaciones en estado sólido y materiales lignocelulósicos, con modificaciones adaptadas a las condiciones experimentales del presente estudio.

Cuantificación de biomasa. La biomasa fúngica se estimó indirectamente mediante el conteo de esporas, realizándose determinaciones cada 72 h durante el proceso de fermentación (días 0, 3, 6, 9, 12 y 15). Para ello, se tomó una muestra de 1 g de sustrato fermentado utilizando una espátula estéril y se suspendió en 10 mL de agua destilada estéril, obteniéndose una relación sólido líquido de 1:10 (p/v). La suspensión se transfirió a tubos cónicos de 50 mL y se homogenizó mediante agitación en vórtex durante 5 min a velocidad media para favorecer la dispersión de las esporas presentes en el sustrato. Posteriormente, se tomó una alícuota de 100 µL de la suspensión y se transfirió a un tubo Eppendorf que contenía 900 µL de agua destilada estéril, obteniéndose una dilución decimal (FD = 10). A partir de esta dilución, se cargó una alícuota en una cámara de Neubauer para realizar el conteo microscópico directo de esporas. La concentración de esporas se calculó considerando el factor de

dilución correspondiente y los resultados se expresaron como esporas por gramo de sustrato (esporas/g). La metodología se basó en procedimientos de recuento microscópico ampliamente utilizados para la cuantificación de biomasa fúngica en sistemas de fermentación en estado sólido, con modificaciones adaptadas a las condiciones experimentales del presente estudio.

Obtención del extracto crudo enzimático. La obtención del extracto crudo enzimático se realizó a partir del sustrato fermentado con el fin de recuperar las enzimas extracelulares producidas durante la fermentación en estado sólido. Para ello, se tomó una muestra de 1 g de sustrato fermentado y se suspendió en 10 mL de agua destilada estéril, manteniendo una relación sólido líquido de 1:10 (p/v). La suspensión se transfirió a tubos cónicos de 50 mL y se homogenizó mediante agitación en vórtex durante 5 min a velocidad media para favorecer la liberación de las enzimas presentes en la matriz sólida. Posteriormente, la suspensión se dejó reposar para permitir la sedimentación de las partículas de mayor tamaño y el sobrenadante obtenido se transfirió a tubos con tapa de rosca de 15 mL. Finalmente, se recuperó una alícuota de 1 mL del sobrenadante, la cual se utilizó como extracto crudo para la determinación de la actividad xilanolítica. La metodología se realizó con modificaciones a partir del procedimiento descrito por Cortez (2015).

Cuantificación de los azúcares reductores. Se cuantificaron durante la hidrólisis del xilano se realizó mediante una curva de calibración elaborada con xilosa como estándar. La relación entre la absorbancia medida a 546 nm y la concentración de xilosa presentó un comportamiento lineal descrito por la ecuación: $y = 0.1574x - 0.0078$ donde (y) corresponde a la absorbancia y (x) a la concentración de xilosa (mg/mL). El ajuste lineal presentó un coeficiente de determinación de ($R^2 = 0.993$), evidenciando una adecuada correlación entre ambas variables. Las concentraciones obtenidas fueron posteriormente convertidas a micromoles de xilosa y utilizadas para el cálculo de la actividad xilanolítica expresada como unidades por gramo de sustrato (U/g).

Determinación de la actividad xilanolítica. La actividad xilanolítica se determinó mediante el método colorimétrico del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) descrito por Miller (1959), el cual cuantifica los azúcares reductores liberados durante la hidrólisis del xilano. Para cada ensayo se mezclaron 67 μ L de una solución de xilano al 0.5 % (p/v) preparada en buffer de citrato 0.05 M a pH 5.3 y 33 μ L del extracto crudo enzimático. La mezcla de reacción se incubó a 50 °C durante 10 min. Posteriormente, se adicionaron 100 μ L de reactivo DNS para detener la reacción y permitir el desarrollo de color. Las muestras se sometieron a ebullición en baño María durante 5 min y posteriormente se enfriaron en baño de agua helada durante aproximadamente 45 min. La absorbancia se determinó a 546 nm utilizando un espectrofotómetro. La concentración de azúcares reductores liberados se estimó mediante una curva de calibración de xilosa. La actividad xilanolítica se expresó como unidades de actividad por gramo de sustrato (U/g) y se calculó mediante la siguiente ecuación: *Actividad xilanolítica*

$(U/g) = \mu mol \times V_{extracción} / t \times V_{enzima} \times g_{sustrato}$. Donde μmol corresponde a los micromoles de xilosa liberados durante la reacción enzimática; $V_{extracción}$ es el volumen total del extracto crudo obtenido; t representa el tiempo de incubación de la reacción enzimática; V_{enzima} corresponde al volumen de extracto utilizado en el ensayo y $g_{sustrato}$ es la masa de sustrato empleada para la extracción. La metodología se basó en el procedimiento reportado por Miller (1959), con adecuaciones a las condiciones experimentales del presente estudio.

Análisis de datos. Los resultados obtenidos se expresaron como la media de tres repeticiones independientes. Para evaluar el comportamiento de la actividad xilanólítica en función del tiempo de fermentación y del tamaño de partícula de la harina de rastrojo de amaranto, se construyeron gráficos de contorno utilizando el software MATLAB® (MathWorks Inc., Natick, MA, USA). Esta herramienta permitió visualizar las regiones de respuesta asociadas a la producción enzimática e identificar tendencias en la cinética de producción de xilanasas bajo las condiciones evaluadas.

RESULTADOS

Caracterización del proceso fermentativo. La evolución del pH y del porcentaje de humedad durante la fermentación en estado sólido de harina de rastrojo de amaranto se presenta en las Figuras 1 y 2. En ambos tratamientos, el pH permaneció relativamente estable durante los 15 días de incubación, independientemente del tamaño de partícula empleado.

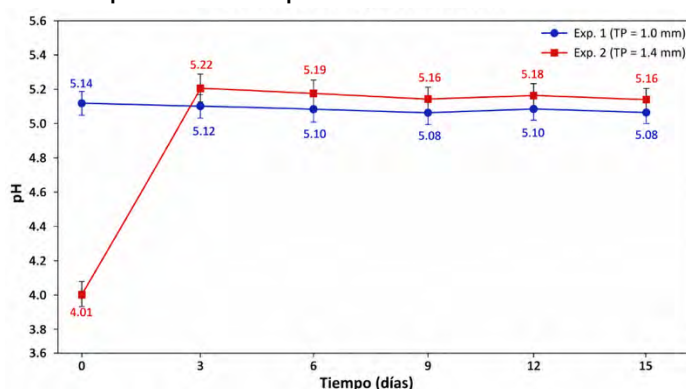


Figura 1. Variación del pH durante la fermentación en estado sólido.

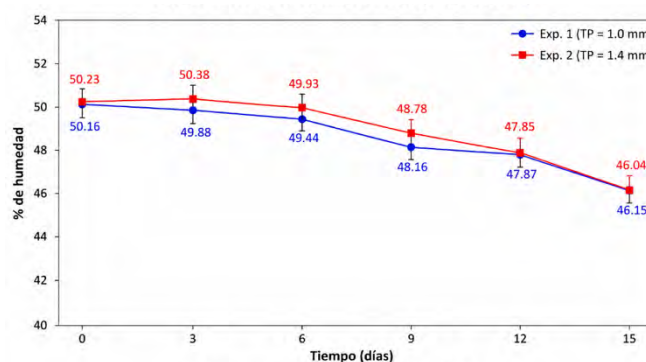


Figura 2. Variación del porcentaje de humedad durante la fermentación en estado sólido.

En el tratamiento con tamaño de partícula de 1.0 mm, el pH presentó una ligera disminución de 5.14 al inicio del proceso hasta 5.08 al día 15, mientras que el tratamiento con partículas de 1.4 mm mostró un incremento inicial desde un valor de 4.01 hasta aproximadamente 5.22 durante los primeros tres días de fermentación, seguido de una estabilización entre 5.15 y 5.19 durante el resto del proceso. Estos resultados indican que, una vez establecido el crecimiento del microorganismo, las condiciones ácido-base del sistema permanecieron prácticamente constantes, favoreciendo el desarrollo de la fermentación.

El contenido de humedad mostró un comportamiento similar en ambos tratamientos. En el sistema con tamaño de partícula de 1.0 mm, la humedad disminuyó gradualmente de 50.16 % a 46.15 % al término de la fermentación, mientras que en el tratamiento con partículas de 1.4 mm la reducción fue de 50.23 % a 46.04 %. En ambos casos, la pérdida de humedad fue progresiva y no superó el 9 % respecto al valor inicial, lo que evidencia que el sistema mantuvo condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso fermentativo durante los quince días de incubación.

En conjunto, los resultados indican que las diferencias observadas posteriormente en la producción de biomasa y actividad xilanolítica no estuvieron asociadas a variaciones importantes del pH ni del contenido de humedad, sino principalmente al efecto del tamaño de partícula sobre el desempeño fisiológico del microorganismo.

Respuesta fisiológica de *A. oryzae* durante la fermentación en estado sólido. La respuesta fisiológica de *A. oryzae* fue evaluada mediante la cuantificación de biomasa y actividad xilanolítica durante la fermentación en estado sólido de harina de rastrojo de amaranto con tamaños de partícula de 1.0 y 1.4 mm. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 1 y 2, mientras que las Figuras 3 y 4 muestran la distribución espacial de ambas respuestas mediante gráficos de contorno.

La producción de biomasa presentó un incremento progresivo durante la fermentación en ambos tratamientos (Figura 3), evidenciando la capacidad del hongo para colonizar el sustrato y desarrollarse bajo las condiciones experimentales evaluadas. Sin embargo, el tratamiento con tamaño de partícula de 1.0 mm mostró una mayor velocidad de acumulación celular, alcanzando un máximo de 1.23×10^8 esporas/g de sustrato al día 9. Posteriormente, la biomasa disminuyó ligeramente al día 12 y mostró una recuperación hacia el final del proceso, registrándose 1.22×10^8 esporas/g de sustrato al día 15.

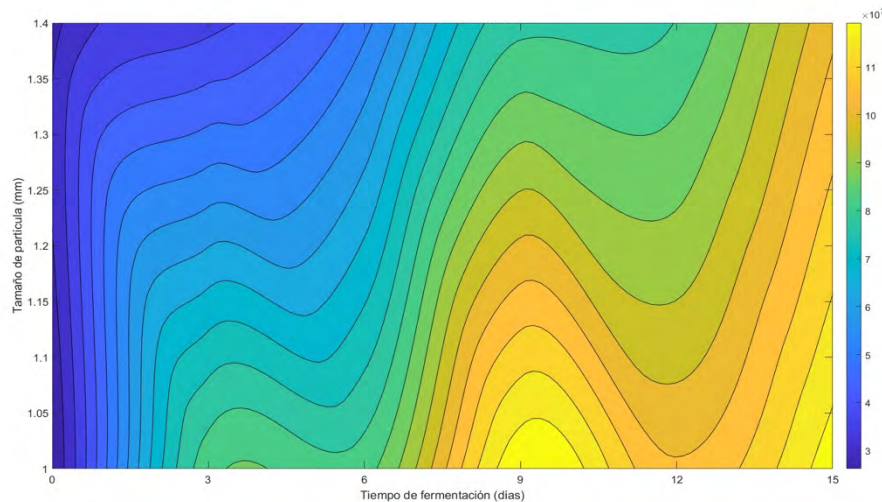


Figura 3. Distribución de la biomasa en función del tiempo de fermentación y el tamaño de partícula.

En contraste, el tratamiento con tamaño de partícula de 1.4 mm presentó un crecimiento más gradual, incrementando desde 2.88×10^7 hasta 1.04×10^8 esporas/g de sustrato al día 15. Aunque ambos tratamientos favorecieron el crecimiento de *A. oryzae*, el tamaño de partícula de 1.0 mm promovió una mayor acumulación de biomasa durante gran parte de la fermentación.

Por otra parte, la producción de actividad xilanolítica mostró un comportamiento diferente al observado para la biomasa (Figura 4). En el tratamiento con tamaño de partícula de 1.0 mm, la actividad enzimática incrementó gradualmente hasta alcanzar un máximo de 7.003 U/g de sustrato al día 12, seguido de una disminución al final del proceso. En contraste, el tratamiento con partículas de 1.4 mm presentó una respuesta más temprana, registrando la mayor actividad xilanolítica (7.713 U/g de sustrato) al día 6 de fermentación. Posteriormente, la actividad disminuyó ligeramente, aunque permaneció superior a 6 U/g de sustrato durante el resto del experimento.

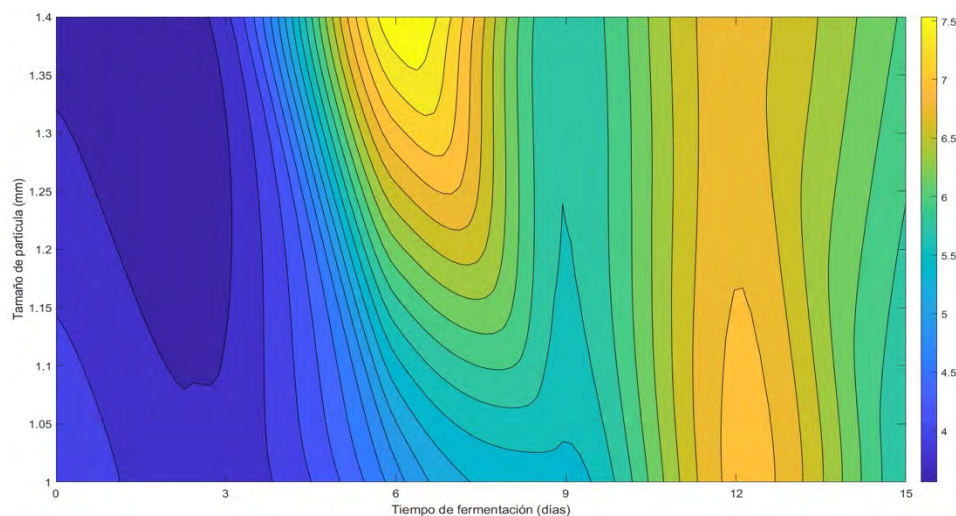


Figura 4. Distribución de la actividad xilanolítica en función del tiempo de fermentación y el tamaño de partícula.

Los gráficos de contorno permitieron complementar la interpretación de los resultados experimentales al representar simultáneamente el efecto del tiempo de fermentación y del tamaño de partícula sobre ambas variables de respuesta. La Figura 3 mostró que la región de mayor acumulación de biomasa se concentró entre los días 9 y 15, asociándose principalmente con partículas cercanas a 1.0 mm. En contraste, la Figura 4 evidenció una región de máxima actividad xilanolítica localizada entre los días 6 y 9 de fermentación y asociada principalmente con tamaños de partícula cercanos a 1.4 mm.

La comparación conjunta de las figuras permitió identificar que las condiciones que favorecieron el crecimiento del microorganismo no coincidieron con aquellas que promovieron la máxima producción de xilanasas. Mientras que las partículas de menor tamaño favorecieron la acumulación de biomasa, las partículas de mayor tamaño promovieron una respuesta enzimática más elevada y en menor tiempo de fermentación. Los gráficos de contorno facilitaron la identificación de estas regiones de respuesta biológica, permitiendo visualizar de manera integral la interacción entre el tiempo de fermentación y el tamaño de partícula sobre el comportamiento fisiológico de *A. oryzae*.

DISCUSIÓN

La fermentación en estado sólido constituye una estrategia biotecnológica eficiente para la producción de enzimas lignocelulolíticas, debido a que reproduce condiciones ambientales similares al hábitat natural de crecimiento de los hongos filamentosos. En el presente estudio, el comportamiento del sistema fermentativo evidenció que tanto el pH como el contenido de humedad permanecieron relativamente estables durante los 15 días de incubación, condiciones que favorecieron el establecimiento y desarrollo de *A. oryzae*. La ligera disminución del contenido de humedad observada en ambos tratamientos puede atribuirse al consumo de agua durante el metabolismo microbiano y a la evaporación gradual propia de los sistemas de fermentación en estado sólido. No obstante, la reducción registrada fue moderada y no comprometió el desarrollo del proceso, lo que sugiere que las condiciones de incubación permitieron mantener un microambiente adecuado para el crecimiento del microorganismo. Estudios recientes han señalado que la estabilidad de la humedad constituye uno de los factores determinantes para mantener la actividad metabólica y la producción de enzimas extracelulares durante la fermentación en estado sólido, ya que influye directamente sobre la disponibilidad de agua, la difusión de nutrientes y el transporte de oxígeno dentro del lecho fermentativo (Perwez *et al.*, 2024; Erismann *et al.*, 2025).

De manera similar, el comportamiento del pH indicó que el sistema alcanzó un equilibrio fisiológico después de los primeros días de fermentación. Aunque el tratamiento con tamaño de partícula de 1.4 mm presentó un incremento inicial del pH, posteriormente ambos sistemas permanecieron dentro de un intervalo cercano a la neutralidad ácida (5.08–5.22), rango considerado favorable para el

crecimiento de *A. oryzae* y para la síntesis de enzimas hemicelulolíticas. La estabilidad del pH sugiere que los procesos de producción y consumo de metabolitos orgánicos alcanzaron un balance durante el desarrollo de la fermentación, evitando cambios bruscos que pudieran afectar la actividad enzimática o el crecimiento del microorganismo. Resultados similares han sido descritos en fermentaciones sólidas de residuos lignocelulósicos, donde la limitada disponibilidad de agua reduce las fluctuaciones extremas del pH en comparación con los sistemas sumergidos (Sun *et al.*, 2024).

Uno de los hallazgos más relevantes de esta investigación fue el efecto diferencial del tamaño de partícula sobre la respuesta fisiológica de *A. oryzae*. El tratamiento con partículas de 1.0 mm favoreció una mayor acumulación de biomasa durante la mayor parte del proceso fermentativo, alcanzando una concentración máxima de 1.23×10^8 esporas g^{-1} al día 9. Este comportamiento puede explicarse porque la reducción del tamaño de partícula incrementa el área superficial disponible para la adhesión del micelio, mejora el contacto entre el microorganismo y el sustrato y facilita el acceso a los polisacáridos estructurales presentes en la harina de rastrojo de amaranto. En consecuencia, el crecimiento vegetativo ocurre con mayor rapidez durante las primeras etapas de colonización. Diversos autores han señalado que partículas de menor tamaño incrementan la eficiencia de colonización debido a una mayor accesibilidad de los nutrientes, aunque este efecto puede verse limitado cuando ocurre una excesiva compactación del lecho fermentativo (Singhania *et al.*, 2022; Perwez *et al.*, 2024).

Sin embargo, el incremento de biomasa no estuvo acompañado por una mayor producción de xilanasas. Contrariamente, la máxima actividad xilanolítica (7.713 U g^{-1}) fue obtenida con el tamaño de partícula de 1.4 mm al sexto día de fermentación. Este resultado demuestra que el crecimiento celular y la producción de enzimas extracelulares respondieron de manera diferente a las condiciones físicas del sustrato. Las partículas de mayor tamaño generan una estructura más porosa que favorece la aireación, mejora la transferencia de oxígeno y disminuye la compactación del material fermentado, condiciones que estimulan la secreción de enzimas extracelulares por los hongos filamentosos. En sistemas de fermentación en estado sólido, la disponibilidad de oxígeno constituye uno de los factores que regulan la expresión de genes relacionados con la producción de hidrolasas, particularmente cuando el sustrato contiene polisacáridos complejos como xilanos y celulosas (Shinkawa y Mitsuzawa, 2020; Sun *et al.*, 2024).

El comportamiento observado coincide con el concepto ampliamente aceptado de que la producción de enzimas hidrolíticas no depende exclusivamente de la cantidad de biomasa generada, sino del estado fisiológico del microorganismo y de las condiciones microambientales presentes durante la fermentación. La síntesis de xilanasas representa una respuesta adaptativa inducida por la presencia

de hemicelulosa en el sustrato y regulada por mecanismos de control transcripcional que responden a la disponibilidad de carbono, oxígeno y otros factores ambientales. Por ello, la etapa de mayor producción enzimática suele presentarse durante fases de crecimiento activo, antes de que el sistema alcance la máxima acumulación de biomasa. Este comportamiento ha sido descrito previamente para diversas especies del género *Aspergillus*, donde la secreción de enzimas lignocelulolíticas alcanza su máximo antes de la fase estacionaria del crecimiento (Teigiserova *et al.*, 2021; Soltero-Sánchez *et al.*, 2025).

En este contexto, uno de los aportes más importantes del presente trabajo fue la incorporación de gráficos de contorno como herramienta para el análisis del comportamiento fisiológico de *A. oryzae*. A diferencia de las curvas cinéticas convencionales, los gráficos de contorno permitieron integrar simultáneamente el efecto del tiempo de fermentación y del tamaño de partícula sobre la producción de biomasa y la actividad xilanolítica. Esta representación facilitó la identificación de regiones de máxima respuesta biológica, evidenciando que la mayor actividad xilanolítica se concentró entre los días 6 y 9 de fermentación con tamaños de partícula cercanos a 1.4 mm, mientras que la mayor acumulación de biomasa ocurrió entre los días 9 y 15 y estuvo asociada principalmente con partículas cercanas a 1.0 mm.

La diferencia entre ambas regiones constituye una evidencia clara del desacoplamiento existente entre el crecimiento fúngico y la producción enzimática. Desde el punto de vista biotecnológico, este resultado es particularmente relevante porque demuestra que las condiciones óptimas para maximizar la biomasa no necesariamente corresponden con aquellas que favorecen la mayor producción de xilanasas. En consecuencia, la optimización de procesos fermentativos destinados a la obtención de enzimas debe orientarse hacia la identificación de las condiciones que maximizan la respuesta metabólica específica y no únicamente el crecimiento del microorganismo. En este sentido, el empleo de gráficos de contorno representa una herramienta útil para visualizar regiones óptimas de operación y apoyar la toma de decisiones durante la optimización de bioprocesos, permitiendo integrar de manera simultánea múltiples variables experimentales y facilitando la interpretación del comportamiento fisiológico del sistema fermentativo.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el tamaño de partícula constituye un factor determinante en la fermentación en estado sólido de harina de rastrojo de amaranto, ya que modifica de manera diferencial el crecimiento de *A. oryzae* y la producción de xilanasas. Asimismo, evidencian que la integración de herramientas de análisis gráfico, como los gráficos de contorno, proporciona información adicional que difícilmente puede identificarse mediante el análisis de curvas cinéticas individuales, fortaleciendo la interpretación de los resultados experimentales y aportando elementos para el diseño y optimización de futuros procesos de producción de enzimas lignocelulolíticas.

CONCLUSIONES

La fermentación en estado sólido de harina de rastrojo de amaranto (*A. hypochondriacus* L.) demostró ser una estrategia viable para la producción de biomasa y xilanasas utilizando *A. oryzae*, evidenciando el potencial de este residuo agrícola como sustrato para procesos biotecnológicos orientados a la valorización de biomasa lignocelulósica. El tamaño de partícula influyó de manera diferencial sobre la respuesta fisiológica del microorganismo durante la fermentación. Las partículas de 1.0 mm favorecieron una mayor acumulación de biomasa, alcanzando valores máximos de **1.23×10^8 esporas g^{-1}** , mientras que las partículas de 1.4 mm promovieron la mayor actividad xilanólítica (**$7.713 U g^{-1}$**) en un menor tiempo de fermentación, lo que demuestra que las condiciones óptimas para el crecimiento celular no coincidieron con aquellas que favorecieron la máxima producción enzimática. Los resultados obtenidos evidenciaron un desacoplamiento entre el crecimiento de *A. oryzae* y la síntesis de xilanasas, indicando que la producción enzimática estuvo asociada principalmente a condiciones fisiológicas específicas y a las características físicas del sustrato, más que a la cantidad total de biomasa producida. Este comportamiento resalta la importancia de evaluar simultáneamente variables de crecimiento y de producción cuando se pretende optimizar procesos fermentativos destinados a la obtención de enzimas extracelulares. La incorporación de gráficos de contorno permitió integrar simultáneamente el efecto del tiempo de fermentación y del tamaño de partícula, facilitando la identificación de regiones de mayor respuesta biológica. Esta herramienta permitió reconocer una región óptima para la producción de xilanasas entre los días **6 y 9** de fermentación con tamaños de partícula cercanos a **1.4 mm**, mientras que la mayor acumulación de biomasa se localizó entre los días **9 y 15** con partículas cercanas a **1.0 mm**. En este sentido, los gráficos de contorno constituyeron una herramienta útil para la interpretación de la respuesta fisiológica del sistema y para la identificación de condiciones de operación con potencial para la optimización de procesos fermentativos. En conjunto, esta investigación aporta evidencia experimental sobre el efecto del tamaño de partícula de harina de rastrojo de amaranto en la fermentación en estado sólido y demuestra que la integración de herramientas de análisis gráfico fortalece la interpretación de los procesos biotecnológicos. Los resultados obtenidos contribuyen al aprovechamiento sostenible de residuos agrícolas y generan información que puede servir como base para futuras estrategias de optimización de la producción de xilanasas a escala piloto e industrial.

REFERENCIAS

- Bhardwaj, N., Kumar, B., & Verma, P. (2023). Recent advances in microbial xylanases: Production, characterization and industrial applications. *Bioresources and Bioprocessing*, 10, 67.
- Erismann, Y., Brück, W. M., & Andlauer, W. (2025). Solid-state fermentation of agro-industrial by-products. *BioTech*, 5(2), 11. <https://doi.org/10.3390/biotech5020011>
- Juturu, V., & Wu, J. C. (2012). Microbial xylanases: Engineering, production and industrial applications. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.006>
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2012). Use of agro-industrial wastes in solid-state fermentation processes. *En Industrial Waste. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/36310>
- Perwez, M., & Al Asheh, S. (2024). Valorization of agro-industrial waste through solid-state fermentation: Mini review. *Biotechnology Reports*, 45, e00873. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00873>
- Polizeli, M. L. T. M., Rizzatti, A. C. S., Monti, R., Terenzi, H. F., Jorge, J. A., & Amorim, D. S. (2005). Xylanases from fungi: Properties and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(5), 577–591. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-1904-7>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- Shinkawa, H., & Mitsuzawa, S. (2020). Feasibility study of on-site solid-state enzyme production by *Aspergillus oryzae*. *Biotechnology for Biofuels*, 13, 31. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01673-6>
- Singhania, R. R., Patel, A. K., Soccol, C. R., & Pandey, A. (2022). Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 181, 108366.
- Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Koceva Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. (2021). A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>
- Soltero-Sánchez, A., Martínez-Hernández, J. L., et al. (2025). Enhancing xylanase and cellulase production by fungal strains under solid-state fermentation. *Fermentation*, 11(10), 578.
- Sun, Z., Wu, Y., Long, S., et al. (2024). *Aspergillus oryzae* as a cell factory: Research and applications in industrial production. *Journal of Fungi*, 10(4), 248. <https://doi.org/10.3390/jof10040248>

- Teigiserova, D. A., Hamelin, L., & Thomsen, M. (2021). Towards transparent valorization of food waste: A review of methodological approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105381>
- Thomas, L., Larroche, C., & Pandey, A. (2013). Current developments in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 81, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.10.013>

EVALUACIÓN DEL RASTROJO DE AMARANTO COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS PREBIÓTICOS MEDIANTE FERMENTACIÓN SÓLIDA CON *Aspergillus oryzae*.

Hazaribagh García Candelaria¹

Massiel Nolasco Vargas²

María De Jesús García Gómez³

RESUMEN

El aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante fermentación sólida (FS) representa una alternativa sostenible para la obtención de compuestos de valor agregado. En este estudio se evaluó el efecto de compuestos con potencial prebiótico (xilooligosacáridos) producidos por FS del rastrojo de amaranto (RA) sobre el crecimiento de microorganismos probióticos (*Bifidobacterias*). La cinética de producción de compuestos con potencial prebiótico (XOS) se realizó por FS del rastrojo de amaranto con *A. oryzae* (1×10^7 esporas/g sustrato), a un pH inicial de 5.6 y 28 °C. Los extractos obtenidos cada 72 h se utilizaron para determinar la biomasa, los azúcares reductores y el crecimiento de *B. breve* y *B. bifidum*. La mayor concentración de biomasa (8.7×10^6 esporas/g de RA fermentado) y azúcares reductores (66 mg/g de RA fermentado) se alcanzaron en los días 9 y 12 del bioproceso, respectivamente. Por otro lado, se observó el mayor crecimiento para *B. breve* en medio suplementado con los extractos del día 6 (6.31×10^8 UFC/mL) con respecto al medio control YPT (4.34×10^8 UFC/mL). Los resultados sugieren la generación de compuestos bioactivos con potencial prebiótico durante la FS del RA, posicionando este residuo como fuente viable para la obtención de ingredientes funcionales.

Palabras clave: bacterias probióticas, residuos agroindustriales, ingredientes funcionales.

INTRODUCCIÓN

El incremento en la generación de residuos agroindustriales lignocelulósicos ha impulsado la búsqueda de estrategias sostenibles para su aprovechamiento biotecnológico. Entre estos residuos, el rastrojo de amaranto representa una biomasa de interés debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que pueden ser transformados en productos de valor agregado mediante procesos biotecnológicos (Carvalho *et al.*, 2008). La valorización de este tipo de biomasa no solo contribuye a la disminución del impacto ambiental asociado a su acumulación, sino también al

¹ Universidad del Papaloapan. hazaribagh@hotmail.com

² Universidad del Papaloapan. maneago2003@gmail.com

³ Universidad del Papaloapan. unpal7@gmail.com

desarrollo de ingredientes funcionales y compuestos bioactivos de interés industrial.

La fermentación sólida (FS) ha sido ampliamente utilizada para el aprovechamiento de materiales lignocelulósicos debido a su capacidad para favorecer el crecimiento de hongos filamentosos sobre sustratos con bajo contenido de humedad, simulando condiciones naturales de desarrollo microbiano (Pandey, 2003). Además, este proceso permite la producción de enzimas hidrolíticas capaces de modificar la estructura de la hemicelulosa y favorecer la liberación de xilooligosacáridos (XOS), compuestos reconocidos por su potencial prebiótico (Aachary y Prapulla, 2011).

Los XOS son oligosacáridos derivados principalmente de la hidrólisis parcial del xilano, componente mayoritario de la hemicelulosa, y han sido reportados por estimular selectivamente el crecimiento de bacterias probióticas del género *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*, favoreciendo la producción de metabolitos benéficos para la salud intestinal (Samanta *et al.*, 2015). En este contexto, el uso de *Aspergillus oryzae* en FS representa una alternativa prometedora, debido a su capacidad de sintetizar enzimas hemicelulolíticas y adaptarse eficientemente a sustratos lignocelulósicos (Thomas *et al.*, 2013).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el rastrojo de amaranto como sustrato para la producción de compuestos con potencial prebiótico mediante FS con *Aspergillus oryzae*.

MARCO TEÓRICO

Residuos agroindustriales lignocelulósicos

Los residuos agroindustriales lignocelulósicos constituyen una de las fuentes de biomasa renovable más abundantes a nivel mundial. Estos materiales incluyen subproductos agrícolas como tallos, hojas, bagazos, cascarillas y rastrojos, cuya acumulación o disposición inadecuada puede generar impactos ambientales negativos, entre ellos la emisión de gases contaminantes derivados de su quema o degradación no controlada (Carvalho *et al.*, 2008). Por ello, en los últimos años ha aumentado el interés por desarrollar estrategias orientadas a su aprovechamiento y valorización biotecnológica.

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, formando una matriz estructural compleja que confiere resistencia a la degradación natural. La hemicelulosa representa una fracción de especial interés debido a su contenido en xilano y otros polisacáridos susceptibles de transformarse en compuestos de valor agregado mediante procesos biológicos y enzimáticos (Sun *et al.*, 2000).

Entre las alternativas de aprovechamiento destacan los procesos fermentativos, particularmente la FS, la cual permite utilizar residuos agrícolas como sustrato para el crecimiento de microorganismos y la producción de metabolitos de interés industrial (Pandey, 2003). A través de estos procesos es posible obtener enzimas, ácidos orgánicos, biocombustibles y compuestos con potencial prebiótico,

contribuyendo al desarrollo de estrategias sostenibles de economía circular.

En este contexto, el rastrojo de amaranto representa una biomasa lignocelulósica con potencial de aprovechamiento biotecnológico debido a su disponibilidad agrícola y a la presencia de hemicelulosa susceptible de ser transformada en carbohidratos solubles y compuestos funcionales mediante FS.

Rastrojo de amaranto como biomasa biotecnológica

El amaranto (*Amaranthus spp.*) es un cultivo de importancia agronómica y nutricional ampliamente distribuido en América Latina, particularmente en México, donde destaca por su adaptación a condiciones ambientales adversas y por el valor nutricional de su semilla (National Research Council, 1984). Sin embargo, además de la producción de su semilla, el cultivo genera cantidades considerables de residuos lignocelulósicos constituidos principalmente por tallos y hojas remanentes después de la cosecha, conocidos como rastrojo de amaranto.

Tradicionalmente, este residuo ha tenido aplicaciones limitadas, tales como forraje de baja calidad, reincorporación al suelo o eliminación mediante quema agrícola, práctica que contribuye a la emisión de contaminantes atmosféricos y al desaprovechamiento de biomasa potencialmente útil (Adhikary *et al.*, 2020). Debido a ello, ha surgido interés en su aprovechamiento como materia prima para procesos biotecnológicos.

El rastrojo de amaranto posee una composición lignocelulósica integrada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La fracción hemicelulósica resulta particularmente relevante debido a la presencia del xilano, el cual puede ser transformado en compuesto de interés, como XOS, mediante procesos de hidrólisis y fermentación (Carvalho *et al.*, 2008). No obstante, la complejidad estructural de la pared celular vegetal limita la accesibilidad a estos polisacáridos, por lo que frecuentemente se requieren estrategias que favorezcan su aprovechamiento biotecnológico, por lo que bioprocesos como la FS utilizando hongos filamentosos representa una alternativa prometedora para la transformación parcial de esta biomasa y la generación de compuestos funcionales de valor agregado.

Fermentación sólida

La FS es un proceso biotecnológico que implica el crecimiento de microorganismos sobre materiales sólidos con baja disponibilidad de agua libre, utilizando el sustrato como soporte físico y fuente de nutrientes (Pandey, 2003). Esta tecnología ha sido ampliamente empleada para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos debido a su capacidad para favorecer la producción de enzimas y metabolitos de interés mediante el desarrollo de microorganismos adaptados a condiciones de baja humedad.

A diferencia de la fermentación sumergida, la FS reproduce condiciones más cercanas al hábitat natural de diversos hongos filamentosos, favoreciendo la colonización del sustrato y la secreción de enzimas extracelulares involucradas en la degradación de polisacáridos estructurales (Viniegra-

González *et al.*, 2003). Entre estas enzimas destacan las xilanasas, β -xilosidasas y otras actividades hemicelulolíticas capaces de modificar parcialmente la estructura de la biomasa vegetal y liberar azúcares solubles derivados de hemicelulosa (Rahardjo *et al.*, 2005).

La FS presenta ventajas importantes para el aprovechamiento de residuos agrícolas, entre ellas el bajo consumo de agua, menor generación de efluentes y la posibilidad de utilizar materias primas de bajo costo como sustrato fermentativo (Thomas *et al.*, 2013). Sin embargo, su eficiencia depende de factores como la humedad, temperatura, pH, tamaño de partícula y microorganismo empleado (Mitchell *et al.*, 2006).

Debido a estas características, la FS constituye una estrategia atractiva para la valorización de biomasa lignocelulósica y la obtención de compuestos de interés biotecnológico, incluyendo carbohidratos solubles y compuestos con potencial actividad prebiótica.

***Aspergillus oryzae* en fermentación sólida**

Aspergillus oryzae es un hongo filamentoso ampliamente utilizado en procesos biotecnológicos debido a su capacidad para crecer sobre sustratos sólidos y producir diversas enzimas extracelulares de interés industrial. Este microorganismo posee estatus GRAS (Generally Recognized As Safe), lo que ha favorecido su aplicación en la producción de alimentos fermentados, enzimas y metabolitos de interés biotecnológico (Barbesgaard *et al.*, 1992).

En FS, *A. oryzae* presenta una elevada capacidad de adaptación a sustratos lignocelulósicos con baja disponibilidad de agua libre, desarrollándose mediante crecimiento micelial y producción de esporas sobre la superficie del material vegetal (Pandey, 2003). Durante este proceso, el hongo secreta enzimas hidrolíticas como celulasas, xilanasas y β -xilosidasas, involucradas en la degradación parcial de polisacáridos estructurales presentes en la biomasa vegetal (Machida *et al.*, 2008).

La producción de enzimas hemicelulolíticas resulta particularmente relevante en materiales ricos en xilano, ya que favorece la liberación de azúcares solubles y compuestos derivados de hemicelulosa, incluyendo XOS con potencial actividad prebiótica. Diversos estudios han reportado el uso exitoso de *A. oryzae* en residuos agroindustriales lignocelulósicos, destacando su capacidad para transformar biomasa vegetal y generar compuestos de valor agregado (Thomas *et al.*, 2013).

Debido a su seguridad alimentaria, capacidad enzimática y adaptación a condiciones de FS, *A. oryzae* representa un microorganismo de interés para la valorización biotecnológica del rastrojo de amaranto y la obtención de compuestos funcionales derivados de hemicelulosa.

Hemicelulosa y producción de XOS

La hemicelulosa es uno de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica y está constituida por una mezcla heterogénea de polisacáridos asociados estructuralmente con la celulosa y la lignina en la pared celular vegetal. Entre sus principales componentes destaca el xilano,

considerado la fracción predominante en numerosos residuos agrícolas y rastrojos vegetales (Carvalho *et al.*, 2008).

El xilano está formado principalmente por cadenas de xilosa unidas mediante enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4), las cuales pueden presentar diferentes sustituyentes que influyen en su estructura y susceptibilidad a la hidrólisis (Samanta *et al.*, 2015). La degradación parcial de este polisacárido permite la formación de XOS, compuestos constituidos por cadenas cortas de xilosa con distintos grados de polimerización.

La producción de XOS a partir de biomasa lignocelulósica ha despertado gran interés debido a su potencial aplicación como ingrediente funcional. Para su obtención, generalmente se emplean procesos de pretratamiento seguidos de hidrólisis química, enzimática o biológica, con el objetivo de incrementar la accesibilidad de la hemicelulosa y favorecer su transformación (Aachary y Prapulla, 2011).

En procesos de FS, diversos hongos filamentosos producen enzimas hemicelulolíticas, como xilanasas y β -xilosidasas, capaces de hidrolizar parcialmente el xilano y generar mezclas de azúcares reductores y XOS (Polizeli *et al.*, 2005). Debido a ello, el aprovechamiento de residuos agrícolas ricos en hemicelulosa representa una estrategia prometedora para la obtención de compuestos de valor agregado a partir de biomasa lignocelulósica.

Azúcares reductores y su relación con biomasa lignocelulósica

Los azúcares reductores son carbohidratos que poseen grupos carbonilo libres capaces de participar en reacciones de oxidación-reducción. Entre los principales azúcares reductores derivados de biomasa lignocelulósica se encuentran glucosa, xilosa, arabinosa y diversos oligosacáridos generados durante la hidrólisis parcial de polisacáridos estructurales (Miller, 1959).

En materiales lignocelulósicos, la producción de azúcares reductores está asociada con la degradación de celulosa y hemicelulosa. La ruptura de enlaces glucosídicos durante procesos químicos, enzimáticos o fermentativos favorece la liberación de carbohidratos solubles provenientes de la pared celular vegetal (Carvalho *et al.*, 2008). Particularmente, la hidrólisis parcial del xilano presentes en la hemicelulosa puede generar xilosa y XOS, compuestos detectables mediante métodos colorimétricos.

La cuantificación de azúcares reductores es ampliamente utilizada para monitorear la transformación de biomasa lignocelulósica y estimar la liberación de carbohidratos fermentables. Entre los métodos más empleados destaca el ensayo con ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), el cual permite determinar la concentración de grupos reductores libres mediante una reacción colorimétrica (Miller, 1959).

Durante la FS, hongos filamentosos como *Aspergillus oryzae* producen enzimas capaces de hidrolizar parcialmente la hemicelulosa, favoreciendo la liberación de azúcares solubles (Polizeli *et al.*, 2005). Por ello, la determinación de azúcares reductores constituye una herramienta útil para evaluar

indirectamente la actividad hidrolítica del microorganismo y la disponibilidad de compuestos potencialmente asociados con carbohidratos derivados de hemicelulosa.

XOS, actividad prebiótica y crecimiento de *Bifidobacterium* como indicador biológico

Los XOS son compuestos formados por cadenas cortas de xilosa derivadas de la hidrólisis parcial del xilano presente en la hemicelulosa de materiales lignocelulósicos (Aachary y Prapulla, 2011). Debido a su resistencia a la digestión en el tracto gastrointestinal superior, estos compuestos alcanzan el colon donde pueden ser fermentados selectivamente por microorganismos benéficos de la microbiota intestinal.

Los XOS son considerados prebióticos por su capacidad para estimular el crecimiento y la actividad metabólica de bacterias probióticas, principalmente especies de los géneros *Bifidobacterium* y *Lactobacillus* (Gibson y Roberfroid, 1995; Samanta *et al.*, 2015). Entre los compuestos más estudiados destacan la xilobiosa y la xilotriosa, las cuales han mostrado una elevada capacidad para favorecer el crecimiento de bifidobacterias.

La producción de XOS a partir de biomasa lignocelulósica ha despertado interés debido a la posibilidad de valorizar residuos agrícolas mediante procesos sostenibles. En este contexto, la FS utilizando hongos filamentosos puede favorecer la liberación de carbohidratos derivados de hemicelulosa mediante la acción de enzimas hemicelulolíticas capaces de hidrolizar parcialmente el xilano presente en la pared celular vegetal (Carvalho *et al.*, 2008).

Debido a la capacidad de las bacterias del género *Bifidobacterium* para metabolizar diversos XOS, el crecimiento de especies como *Bifidobacterium breve* y *Bifidobacterium bifidum* puede emplearse como un indicador biológico indirecto de la presencia de compuestos con potencial actividad prebiótica (Samanta *et al.*, 2015). Por ello, la evaluación del crecimiento bacteriano en extractos obtenidos durante la FS constituye una herramienta complementaria a los análisis químicos, permitiendo explorar el potencial funcional de los carbohidratos solubles generados a partir del rastrojo de amaranto.

JUSTIFICACIÓN

A pesar de que el interés científico y productivo sobre el amaranto se ha enfocado principalmente en el valor nutricional y comercial del grano, los residuos lignocelulósicos generados después de la cosecha representan una biomasa subutilizada con alto potencial para procesos biotecnológicos. En regiones agrícolas, donde el cultivo de amaranto forma parte de sistemas de producción tradicionales, el rastrojo es frecuentemente desaprovechado o eliminado mediante prácticas como la quema agrícola, generando impactos ambientales y pérdida de recursos potencialmente valorizables (Adhikary *et al.*, 2020).

El rastrojo de amaranto contiene cantidades importantes de hemicelulosa, celulosa y lignina; componentes estructurales que pueden ser transformados mediante procesos fermentativos con hongos filamentosos para la obtención de compuestos funcionales de interés alimentario y biotecnológico. Entre estos compuestos destacan los XOS, derivados de la hidrólisis parcial del xilano presente en la hemicelulosa, los cuales han sido ampliamente estudiados por su capacidad para estimular selectivamente el crecimiento de bacterias probióticas del género *Bifidobacterium* (Aachary y Prapulla, 2011). Debido a ello, existe un creciente interés en el desarrollo de estrategias sostenibles para la producción de prebióticos a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos. Esta investigación busca generar información sobre el potencial del rastrojo de amaranto como materia prima para la producción de compuestos con actividad prebiótica, cuantificando los azúcares reductores de extractos obtenidos durante la FS y evaluando su uso en el crecimiento de *Bifidobacterium breve* y *Bifidobacterium bifidum*.

OBJETIVO

Evaluar el aprovechamiento biotecnológico del rastrojo de amaranto mediante FS con *Aspergillus oryzae* para la obtención de compuestos con potencial prebiótico, particularmente XOS, mediante la determinación de azúcares reductores y el crecimiento de bacterias probióticas del género *Bifidobacterium*.

METODOLOGÍA

Recolección de materia prima

El rastrojo de amaranto utilizado en este estudio estuvo constituido por tallos y hojas obtenidos posterior a la cosecha del cultivo. El material vegetal fue recolectado y se sometió a un proceso de secado a temperatura ambiente. En el laboratorio, el material se trituró para después someterlo a un secado en horno a una temperatura de 50°C por 24h, posteriormente se molió y tamizo (tamaño de partícula 1.4 mm) para obtener un polvo que se le denominará harina de rastrojo de amaranto (HRA). Esta se almacenó en bolsas herméticas hasta su utilización (Sluiter *et al.*, 2012).

Fermentación sólida del rastrojo de amaranto

La FS de la HRA se realizó utilizando *Aspergillus oryzae* como microorganismo fermentador. Muestras de 25 g de HRA se fermentaron ajustándolo a una humedad aproximada de 95 %, pH de 5.6, concentración del inóculo de 1×10^7 esporas/g de HRA. Se incubaron durante 15 días a 28 °C con muestreos cada 72 h.

Determinación de azúcares reductores

La cuantificación de azúcares reductores liberados durante la FS se realizó mediante el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), descrito por Miller (1959).

Para la obtención de los extractos, se tomaron muestras fermentadas cada 72 h (días 0, 3, 6, 9, 12 y 15). Posteriormente, se prepararon extractos acuosos utilizando una relación 1:10 (p/v), adicionando 1 g de muestra fermentada en 10 mL de agua destilada estéril. Las muestras fueron homogenizadas y agitadas con la finalidad de favorecer la liberación de compuestos solubles derivados de la degradación parcial de la biomasa lignocelulósica.

Después de la homogenización, los extractos fueron centrifugados para eliminar residuos sólidos y recuperar la fracción líquida soluble utilizada para el análisis de azúcares reductores. Posteriormente, se mezcló un volumen determinado del extracto con el reactivo DNS y las muestras fueron sometidas a calentamiento en baño María para favorecer el desarrollo de color.

Finalizada la reacción, las muestras fueron enfriadas a temperatura ambiente y la absorbancia fue medida mediante espectrofotometría. La concentración de azúcares reductores fue calculada utilizando una curva de calibración elaborada con xilosa como estándar, debido a que la hemicelulosa del rastrojo de amaranto está constituida principalmente por xilano, cuyos productos de hidrólisis incluyen xilosa y XOS.

Los resultados obtenidos fueron expresados como mg de azúcares reductores por gramo de muestra fermentada. Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados como promedio $\pm$ desviación estándar y error estándar.

La determinación de azúcares reductores permitió evaluar indirectamente la hidrólisis parcial de la hemicelulosa durante la FS, así como la posible liberación de compuestos derivados de xilano con potencial prebiótico (Aachary y Prapulla, 2011).

Evaluación del crecimiento de *Bifidobacterium*

Los extractos obtenidos durante la FS fueron utilizados para evaluar indirectamente la presencia de compuestos con potencial prebiótico mediante ensayos de crecimiento bacteriano utilizando *Bifidobacterium breve* y *Bifidobacterium bifidum*.

Las bacterias fueron inoculadas en medio YPT (Yeast Extract–Peptone–Tryptone) suplementado con los extractos obtenidos de la FS y posteriormente incubadas bajo condiciones adecuadas de crecimiento anaerobio. El crecimiento bacteriano fue utilizado como indicador biológico del posible aprovechamiento de compuestos derivados de hemicelulosa, particularmente XOS.

La evaluación del crecimiento de bacterias del género *Bifidobacterium* es ampliamente utilizada en estudios relacionados con compuestos prebióticos debido a su capacidad para metabolizar oligosacáridos derivados de xilano (Aachary y Prapulla, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Producción de azúcares reductores durante la fermentación sólida

La concentración de azúcares reductores presentó variaciones a lo largo de la FS del rastrojo de amaranto utilizando *Aspergillus oryzae* (Figura 1). Al inicio del proceso (día 0) se registró una concentración de 37.75 mg/gEF (miligramos/gramos de extracto fermentado), la cual incrementó progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 71.81 mg/gEF al día 15, representando un aumento de 1.90 veces respecto al valor inicial.

El incremento más importante se observó durante los primeros días de fermentación, alcanzándose una concentración de 65.94 mg/gEF al día 6. Posteriormente, durante los días 9 y 12 se registraron valores de 62.79 y 65.49 mg/gEF, respectivamente, evidenciando ligeras fluctuaciones en la concentración de azúcares reductores. Finalmente, al día 15 se observó la mayor concentración de carbohidratos solubles liberados durante el proceso.

Este comportamiento sugiere que la FS favoreció la transformación parcial de la biomasa lignocelulósica y la liberación de carbohidratos solubles. Diversos estudios han reportado que *Aspergillus oryzae* produce enzimas hemicelulolíticas, tales como xilanasas y β -xilosidasas, capaces de hidrolizar parcialmente al xilano presente en la hemicelulosa y generando azúcares reductores y otros compuestos solubles de interés biotecnológico (Polizeli *et al.*, 2005; Machida *et al.*, 2008).

Las fluctuaciones observadas entre los días 6 y 12 podrían atribuirse al equilibrio existente entre la liberación de carbohidratos por acción enzimática y su posterior consumo por el hongo como fuente de carbono para el crecimiento micelial y la producción de esporas. Sin embargo, el incremento final registrado al día 15 indica que la liberación neta de compuestos solubles continuó siendo significativa bajo las condiciones evaluadas.

Los resultados obtenidos sugieren que la FS del rastrojo de amaranto favoreció la generación de carbohidratos derivados de la hemicelulosa, potencialmente asociados con xilosa, XOS y otros compuestos de interés funcional.

Resultados similares han sido reportados en procesos de valorización de biomasa lignocelulósica mediante FS utilizando hongos filamentosos. Thomas *et al.* (2013) señalaron que la actividad hemicelulolítica desarrollada durante la fermentación favorece la liberación progresiva de carbohidratos solubles derivados de la hemicelulosa, observándose incrementos en la concentración de azúcares reductores conforme avanza el proceso fermentativo. De manera similar, Polizeli *et al.* (2005) reportaron que la producción de xilanasas y β -xilosidasas por hongos filamentosos puede promover la hidrólisis parcial de xilanos y la generación de mezclas complejas de xilosa y XOS. En el presente estudio, el incremento de azúcares reductores hasta alcanzar 71.81

mg/gEF al día 15 sugiere que *Aspergillus oryzae* fue capaz de transformar parcialmente la fracción hemicelulósica del rastrojo de amaranto, favoreciendo la acumulación de compuestos solubles potencialmente asociados con productos de degradación de xilano.

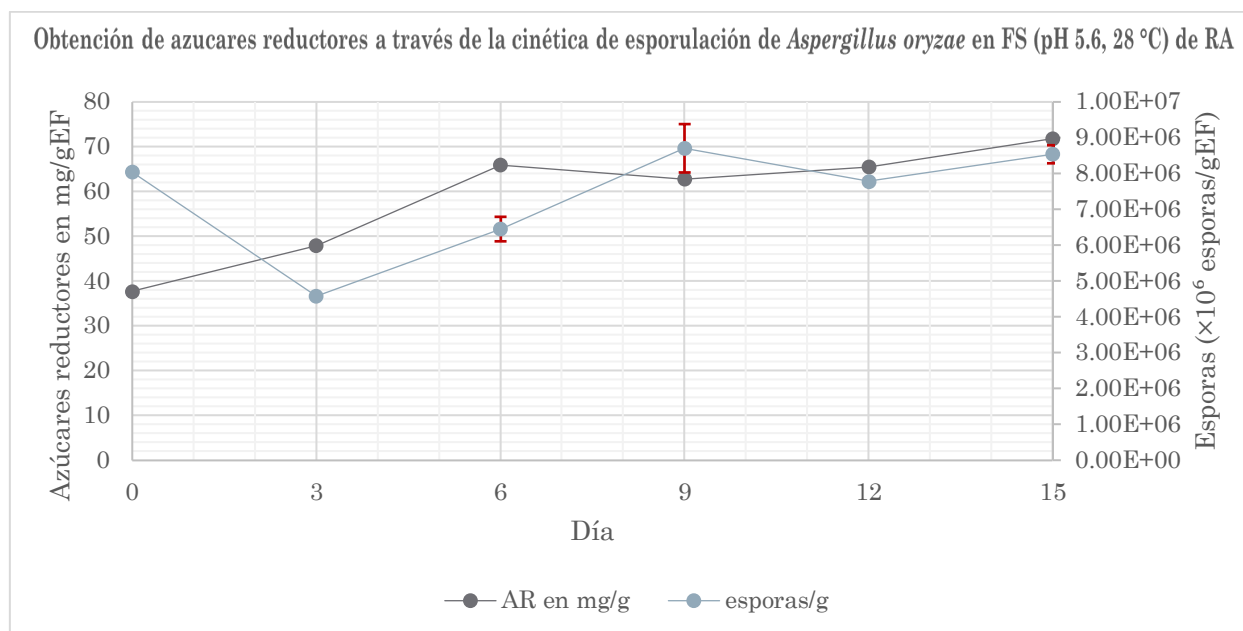


Figura 1. Relación entre la concentración de azúcares reductores y la producción de esporas durante la FS a de rastrojo de amaranto utilizando *Aspergillus oryzae* a pH 5.6 y 28 °C. Los valores representan la media de tres réplicas $\pm$ EE.

Crecimiento de *Bifidobacterium* en medios suplementados con extractos fermentados

Las cepas *Bifidobacterium breve* y *Bifidobacterium bifidum* fueron capaces de desarrollarse tanto en el medio control YPT como en los medios suplementados con extractos obtenidos durante la FS del rastrojo de amaranto (Cuadro 1). Sin embargo, la respuesta observada dependió de la cepa evaluada y del tiempo de fermentación del cual se obtuvo el extracto.

Para *B. breve*, el mayor crecimiento se registró con el extracto correspondiente al día 6 de fermentación, alcanzando una concentración de 6.31×10^8 UFC/mL, mientras que el control presentó 4.34×10^8 UFC/mL. En los extractos de los días 9 y 12 también se observó un incremento respecto al control, aunque de menor magnitud.

Por su parte, *B. bifidum* presentó un comportamiento diferente. El extracto correspondiente al día 6 mostró una menor concentración celular respecto al control. Sin embargo, en los extractos obtenidos de los días 9 y 12 se registró un incremento en el crecimiento bacteriano en comparación con el medio YPT. *B. breve* presentó incrementos de 1.23 a 1.45 veces respecto al control, mientras que *B. bifidum* mostró incrementos más modestos (1.16–1.21 veces), observándose incluso una reducción del crecimiento en el extracto correspondiente al día 6 (0.38 veces respecto al control).

En general, los resultados muestran que los extractos obtenidos durante la FS fueron capaces de favorecer el crecimiento bacteriano, particularmente en *B. breve*, siendo el extracto correspondiente al día 6 el que presentó la respuesta más favorable.

La respuesta observada podría estar relacionada con la presencia de carbohidratos solubles derivados de la hidrólisis parcial de la hemicelulosa. Diversos autores han señalado que especies del género *Bifidobacterium* poseen la capacidad de metabolizar XOS y otros oligosacáridos derivados de xilano, favoreciendo su crecimiento y actividad metabólica (Samanta *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2022). En este sentido, la coincidencia entre las mayores concentraciones de azúcares reductores y la estimulación del crecimiento bacteriano sugiere la posible generación de compuestos con potencial actividad prebiótica durante la FS del rastrojo de amaranto.

La estimulación observada en el crecimiento de *Bifidobacterium breve* coincide con lo reportado por diversos autores que han evaluado la actividad prebiótica de XOS obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica. Achary y Prapulla (2011) señalaron que los XOS derivados de xilano poseen una elevada capacidad para estimular selectivamente el crecimiento de especies del género *Bifidobacterium*, particularmente cuando predominan oligómeros de bajo grado de polimerización, como xilobiosa y xilotriosa. Asimismo, Samanta *et al.* (2015) reportaron que la respuesta bacteriana puede variar en función de la composición y longitud de cadena de los oligosacáridos presentes, observándose diferencias incluso entre especies del mismo género. Lo anterior podría explicar las diferencias observadas entre *B. breve* y *B. bifidum* en el presente estudio, sugiriendo que la composición de los carbohidratos liberados durante la FS cambió conforme avanzó el proceso y que los extractos obtenidos en etapas tempranas pudieron contener compuestos más favorables para el crecimiento de *B. breve*.

Cuadro 1. Crecimiento de cepas de *Bifidobacterium* en medio YPT y medio suplementado con extractos obtenidos de la FS del rastrojo de amaranto.

epa	Día	AR (mg/g)	Control YPT (UFC/mL)	Extracto fermentado (UFC/mL)	Diferencia (UFC/mL)	Incremento (veces)
<i>B. breve</i>	6	65.94	4.34×10^8	6.31×10^8	$+1.97 \times 10^8$	1.45
<i>B. breve</i>	9	62.79	2.44×10^8	2.99×10^8	$+5.5 \times 10^7$	1.23
<i>B. breve</i>	12	65.49	1.98×10^8	2.47×10^8	$+4.9 \times 10^7$	1.25
<i>B. bifidum</i>	6	65.94	5.38×10^8	2.02×10^8	-3.36×10^8	0.38
<i>B. bifidum</i>	9	62.79	1.99×10^8	2.40×10^8	$+4.1 \times 10^7$	1.21
<i>B. bifidum</i>	12	65.49	1.58×10^8	1.84×10^8	$+2.6 \times 10^7$	1.16

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demostraron que la FS del rastrojo de amaranto mediante *Aspergillus oryzae* bajo condiciones estandarizadas de pH 5.6 y 28 °C favorece la liberación progresiva de azúcares reductores a partir de la degradación de la fracción lignocelulósica del sustrato. La concentración de azúcares reductores presentó un incremento durante el proceso fermentativo, alcanzando valores superiores a 60 mg/gEF a partir del día 6 y un máximo de 71.81 mg/gEF al día 15, lo que evidencia una importante actividad hidrolítica del microorganismo sobre la hemicelulosa del rastrojo de amaranto. El comportamiento cinético observado sugiere que de los días 6 al 9 incluyendo el día 12 ocurre una etapa metabólicamente activa en la cual existe una elevada liberación de carbohidratos solubles asociada al incremento en la producción de esporas. Esta relación indica una posible generación de XOS derivados de la hidrólisis parcial del xilano presente en la biomasa lignocelulósica.

Los ensayos de crecimiento bacteriano mostraron que los extractos obtenidos durante la fermentación fueron capaces de estimular de manera selectiva el crecimiento de bacterias del género *Bifidobacterium*, particularmente *B. breve* presentó el mayor incremento celular utilizando el extracto correspondiente al día 6 de fermentación. Asimismo, *B. bifidum* mostró una respuesta positiva en los extractos obtenidos en los días 9 y 12, lo que sugiere diferencias en la capacidad metabólica de aprovechamiento de los compuestos presentes en los extractos fermentados.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la FS del rastrojo de amaranto mediante *Aspergillus oryzae* constituye una estrategia biotecnológica prometedora para la obtención de extractos ricos en compuestos solubles con potencial prebiótico, posiblemente asociados a XOS generados durante la degradación controlada de la hemicelulosa.

REFERENCIAS

- Aachary, A. A., Prapulla, S. G. (2011). Xylooligosaccharides (XOS) as an emerging prebiotic: Microbial synthesis, utilization, structural characterization, bioactive properties, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(1), 2–16.
- Adhikary, D., Khatri-Chhetri, R., Slaski, J. J. (2020). Amaranth as a crop of future: Status, challenges and opportunities. *Agronomy*, 10, 1408.
- Barbesgaard, P., Heldt-Hansen, H. P., Diderichsen, B. (1992). On the safety of *Aspergillus oryzae*: A review. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36, 569–572.
- Carvalho, F., Duarte, L. C., Gírio, F. M. (2008). Hemicellulose biorefineries: A review on biomass pretreatments. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 67, 849–864.
- Gibson, G. R., Roberfroid, M. B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: Introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*, 125(6), 1401–1412.

- Machida, M., Yamada, O., Gomi, K. (2008). Genomics of *Aspergillus oryzae*: Learning from the history of Koji mold and exploration of its future. *DNA Research*, 15(4), 173–183.
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428.
- Mitchell, D. A., Krieger, N., Stuart, D. M., Pandey, A. (2006). New developments in solid-state fermentation II. Rational approaches to the design, operation and scale-up of bioreactors. *Process Biochemistry*, 41(9), 1881–1893.
- National Research Council. (1984). *Amaranth: Modern prospects for an ancient crop*. National Academy Press.
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2–3), 81–84.
- Polizeli, M. L. T. M., Rizzatti, A. C. S., Monti, R., Terenzi, H. F., Jorge, J. A., Amorim, D. S. (2005). Xylanases from fungi: Properties and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67, 577–591.
- Rahardjo, Y. S. P., Tramper, J., Rinzema, A., Weber, F. J. (2005). Aerial mycelia of *Aspergillus oryzae* accelerate α -amylase production in solid-state fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(7), 900–902.
- Samanta, A. K., Jayapal, N., Jayaram, C., Roy, S., Kolte, A. P., Senani, S., Devi, A. (2015). Xylooligosaccharides as prebiotics from agricultural by-products: Production and applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5, 62–71.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D. (2012). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-510-42618).
- Sun, R. C., Tomkinson, J., Ma, P. L., Liang, S. F. (2000). Comparative study of hemicelluloses from rice straw by alkali and hydrogen peroxide treatments. *Carbohydrate Polymers*, 42(2), 111–122.
- Thomas, L., Larroche, C., Pandey, A. (2013). Current developments in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 81, 146–161.
- Viniegra-González, G., Favela-Torres, E., Aguilar, C. N., Romero-Gómez, S. J., Díaz-Godínez, G., Augur, C. (2003). Advantages of fungal enzyme production in solid state over liquid fermentation systems. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2–3), 157–167.
- Yao, Y., Lu, Y., Zhang, Y., Wang, H., Chen, W. (2022). Prebiotic effects of xylooligosaccharides on *Bifidobacterium* growth and gut microbiota modulation: A review. *Foods*, 11, 3201.

EFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE EL DESARROLLO VEGETATIVO DEL PASTO CUBA 22 (*Cenchrus purpureus* VC. Om-22)

Jesús Herrera Alarcón¹
Jonatan López Domínguez²
Edgar Alexander Reyes Utrera³
Ignacio Garay Peralta⁴

RESUMEN

Los pastos representan la principal fuente de alimento de los bovinos en los sistemas productivos del trópico, su buen manejo puede aportar una importante cantidad de nutrientes a estos.

El pasto Cuba 22 representa una alternativa estratégica por su potencial productivo y valor nutritivo. Cuba 22 (OM-22) es un clon/híbrido de *Cenchrus purpureus* (antes *Pennisetum purpureum*) desarrollado en Cuba; se establece asexualmente por varetas (estacas) de tallo con 2–4 nudos. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de cuatro densidades de siembra (1, 2, 4 y 6 plantas·m⁻²) sobre el desarrollo vegetativo del pasto Cuba 22 establecido por varetas durante la fase de implantación. Se utilizó un Diseño Experimental de Bloques al Azar, con 4 tratamientos (densidades) y 4 repeticiones (bloques) teniendo un total de 16 parcelas. Las variables evaluadas fueron prendimiento y supervivencia, altura de planta (m), número de macollos·m⁻², diámetro de tallo (mm), longitud y relación tallo:hoja y por último la biomasa, a través de 90 días, período considerado para que se implante el pasto. Los datos fueron organizados en una hoja de Excel 2013, posteriormente se analizaron en el programa estadístico software Statistical Analysis System (SAS). Se encontró mayor porcentaje de materia seca y kg de materia verde en el tratamiento T4, debido básicamente a un mayor número de tallos. No se notaron diferencias en cuanto al diámetro del tallo a pesar de existir diferentes números de plantas en los tratamientos. No hubo diferencias en el número de macollos por tratamiento. Existe una significancia en la comparación de las cuatro densidades en cuanto a la sobrevivencia. El T4 resultó ser el tratamiento con mayor altura, T1 produjo menor cantidad de materia verde por m². No hubo diferencias en el porcentaje de materia seca por tratamiento.

Palabras clave: sobrevivencia, densidades, macollos, biomasa.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jesus.ha@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Jonatan.99.jl@gmail.com

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. edgararu1606@gmail.com

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Ignacio.gp@ugalvan.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

Los forrajes son un componente básico en los sistemas de producción pecuaria. Por lo tanto, los pastos representan la principal fuente de alimentación de los bovinos, por lo que se deben de buscar especies o variedades que sea de un adecuado valor nutricional, de fácil manejo y palatables. El pasto Cuba 22 (*Pennisetum purpureum x Pennisetum glaucum*) representa una alternativa estratégica por su potencial productivo y valor nutritivo. Es una de las variedades más nutritivas y eficientes usadas como forrajes para el ganado de doble propósito, además de su capacidad para resistir enfermedades y plagas lo que lo convierte en una buena opción para desarrollar y cultivar (Morocho et al., 2023). De acuerdo con Álvarez Báez et al. (2020), el pasto Cuba 22 posee un 19% de proteína cruda y un 80% de digestibilidad, así mismo es muy palatable, aunado a que no posee tricomas evitando la irritación, lo que lo convierte en succulento para el ganado y manejable para los trabajadores. Otros autores como Moreira-Macias et al. (2025) mencionan sus cualidades como una alta producción de biomasa, resistencia a la sequía, de rápida recuperación en temporada de lluvias, elevado contenido proteico, de crecimiento veloz, con gran cantidad de hojas y tallos anchos.

Según (Porfirio et al., 2021), la densidad de siembra se refleja en la competencia por interceptación de luz como por espacio y nutrientes, reflejándose en el crecimiento de las hojas, tallos, área foliar y biomasa de la planta

Por lo anterior este pasto es un prometedor de ser una solución a la problemática en la alimentación bovina: escasa disponibilidad y calidad de forrajes, sobre todo en la temporada de sequías. Pero para ello el forraje debe de ser manejado adecuadamente, en lo que se refiere a fertilización, densidad de siembra, riegos, pastoreo, etc.

Por lo tanto, el Pasto Cuba 22, además de ofrecer grandes cualidades presenta algunos desafíos en cuanto a planificación, manejo, cuidados. Por cual se planteó como objetivo evaluar el efecto de cuatro densidades de siembra (1, 2, 4 y 6 plantas·m⁻²) sobre el desarrollo vegetativo del pasto Cuba 22 establecido por varetas durante la fase de implantación, para conocer su comportamiento con diferentes números de plantas por metro cuadrado, todo esto dentro de los primeros 100 días de desarrollo, después de su siembra por esquejes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación: la investigación se desarrolló en un área experimental, dentro de la superficie del Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, Veracruz, México, con una altitud de 20 msnm.

Se evaluó el efecto de la densidad de plantas por metro cuadrado en cinco edades de corte 30, 45, 60, 75 y 90 días en el pasto Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* Schumach x *Pennisetum glaucum* L.). Para ello se utilizó un Diseño Experimental de Bloques completos al azar (BCA) con 4 tratamientos (densidades) y 4 repeticiones (bloques) haciendo un total de 16 parcelas, en las cuales se eliminó el efecto de orilla o de borde. El T1 con densidad muy baja (1 planta por m²), T2 con densidad baja (2 plantas por m²), T3 con densidad media (4 plantas por m²) y T4 con densidad alta (6 plantas por m²). El tamaño de la unidad experimental fue de 4 m².

El trabajo fue realizado en el periodo del septiembre a diciembre del 2025, en una etapa de 90 días en donde interfirieron condiciones medioambientales de la región. Se realizaron actividades de preparación del terreno, siembra de forma manual empleando tallos de plantas maduras (varetas de tres nudos), espaciados de acuerdo con la densidad a establecer, el control de malezas se realizó antes y durante la investigación. Las malezas se eliminaron utilizando labores culturales, antes de la siembra se utilizaron chapeos manuales y la aplicación de herbicida 2,4-D amina (1 L/ha) y Glifosato (2 L/ha), con aplicación manual (bomba de mochila CP3 de 20 litros de agua), pero entre las calles de cada parcela. No se presentaron problemas con plagas o enfermedades por lo cual no se utilizó insecticidas para el control de estos.

Materiales: se emplearon esquejes del pasto Cuba OM-22

La siembra se realizó bajo 4 densidades diferentes, T1: 2 plantas/m² a 1.0 X 1.0 m (16 plantas), T2: 2 plantas/m² a 1.0 X .50 m (21 plantas), T3: 4 plantas/m² a 0.50 X 0.50 m (32 plantas) y T4: 6 plantas/m² a 0.50 X 0.30 m (40 plantas).

Variables evaluadas

Independiente: Densidad de siembra (1, 2, 4, 6 plantas·m⁻²).

Dependientes (vegetativas):

Prendimiento y supervivencia (%) a 21 y 30 DDP (días después de plantación).

Altura de planta (cm), número de macollos·m⁻², diámetro de tallo (mm), longitud y ancho de hoja (cm). Medición a los 30, 45, 60, 75 y 90 DDP.

Biomasa a primer corte: forraje verde (t·ha⁻¹), materia seca (t·ha⁻¹), % MS. Medición a los 90 DDP.

Diseño y análisis

Los datos obtenidos de las diferentes variables fueron capturados en el programa de Excel 2013 y una vez obtenidos los resultados se realizó un ANDEVA para comparar las medias se evaluaron usando la prueba de Tukey al $\geq 0.05\%$ utilizando un DBCA.

RESULTADOS

Con respecto a las variables número de macollos, diámetro del tallo (mm) y numero de hojas por tallo no existen diferencias por tratamiento, habiendo un comportamiento similar en cada uno de ellos.

En relación con la variable altura del pasto, fue en aumento conforme transcurrió el tiempo después de su siembra, sin importar el tratamiento evaluado (Fig. 1). Sin embargo, para el caso de la altura alcanzada por estos si hubo diferencias entre los cuatro tratamientos evaluados, siendo mayor el tratamiento de mayor densidad por metro cuadrado, T4 (6 plantas por m²) (Fig. 2).

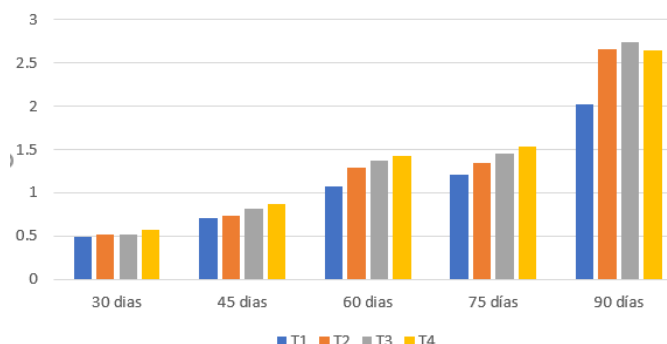


Fig. 1. Comportamiento de la altura del Cuba 22 a través del tiempo. Fuente: Elaboración propia

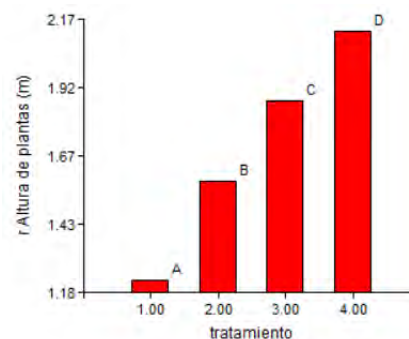


Fig. 2. Comportamiento de la altura del pasto vs densidad de las plantas. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al número de tallos por metro cuadrado, se encontró que, si existe diferencia significativa entre el tratamiento 1 y el tratamiento 4, no así entre los demás tratamientos (Fig. 3).

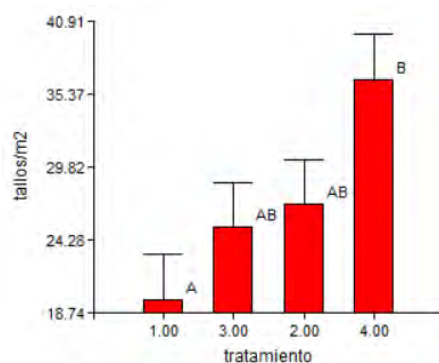


Fig. 3. Presencia de numero de tallos de Pasto Cuba 22 por metro cuadrado. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la cantidad de materia verde (kgs) por metro cuadrado, si existe una diferencia significativa entre el tratamiento 1 con respecto a los demás tratamientos (Fig. 4). En la figura 5, se puede observar la cantidad total de materia vegetal (hojas y tallos, en verde) por hectárea a una edad de 90 días, en un pasto que está en desarrollo.

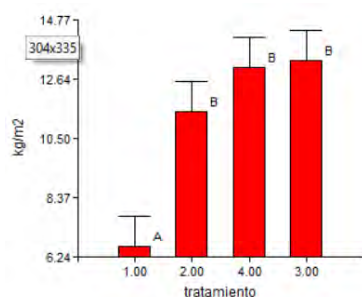


Fig. 4. Producción de biomasa por metro cuadrado. Fuente: Elaboración propia

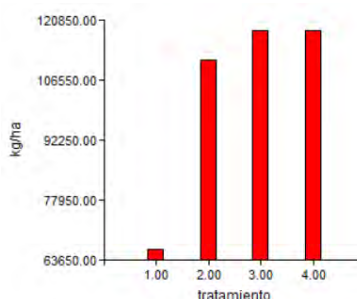


Fig. 5. Producción de forraje verde por hectárea, a una edad de corte de 90 días. Fuente: Elaboración propia

Para la variable porcentaje de prendimiento o sobrevivencia de la varetas, puede notarse diferencia entre el tratamiento 3 y el 2 no así para los demás (Fig. 6), pero de forma general se puede decir que hubo un buen porcentaje, ya que se alcanzó el 90% en promedio de los cuatro tratamientos.

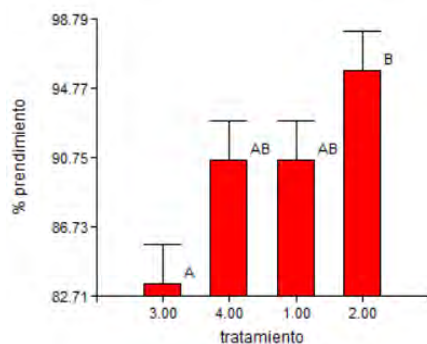


Fig. 6. Porcentaje de sobrevivencia de las varetas de pasto Cuba 22. Fuente: Elaboración propia

Para la variable número de tallos por metro cuadrado, era de esperarse que el T4, de mayor densidad, presentara diferencia estadística en relación con el T1, donde se sembró el menor número de plantas (Fig. 7).

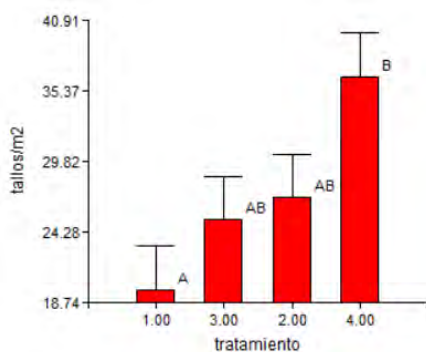


Fig. 7. Numero de tallos de pasto Cuba 22 localizados por metro cuadrado Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de materia seca no presento diferencias en ellos cuatro tratamientos (Fig. 8), debido a que todas las plantas presentaban la misma edad y manejo.

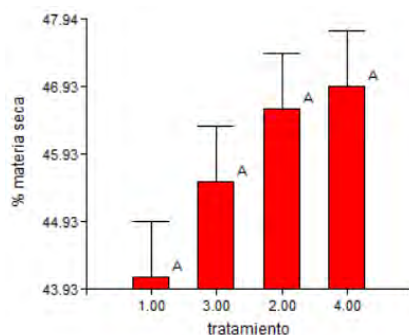


Fig. 8. Porcentaje de materia seca del pasto Cuba 22. Fuente: Elaboración propia

Para la última variable medida, correspondiente a la Relación tallo: hoja, se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento 4 y el tratamiento 2, existiendo mayor porcentaje de hoja en comparación al tallo en el T2 (Fig. 9). Lo que favorece una mayor digestibilidad, aunque la relación está por debajo del 60%.

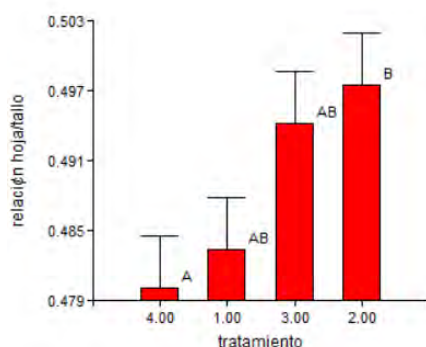


Fig. 9. Análisis comparativo de la relación hoja: tallo por tratamientos de diferentes densidades. Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Considerando a Pérez-Estévez S.A. et al. (2020), el mejor momento del corte del pasto Cuba OM-22 es cuando tiene mayor rendimiento de hoja, lo cual según su estudio sucedió a los 90 días después del corte, cabe aclarar que en el presente trabajo se realizó el corte a los 90 días después de su siembra por esquejes o varetas.

En cuanto a la altura el pasto esta fue inferior a la alcanzada por otros autores a los 60 días, siendo menor 1.50 m, lo cual pudo deberse a que el pasto estaba apenas en implantación, a diferencia de los otros que ya habían recibido un corte de uniformidad, por ser pastos ya con un buen desarrollo radicular.

La distancia de siembra afecta el rendimiento de los forrajes, donde las densidades de siembra más altas provocan aumento mayor producción de biomasa, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo.

REFERENCIAS

- Álvarez Báez, Y., Ramírez de la Rivera, J.L., Verdecia Acosta, D.M., Arceo Benítez, Y., Rodríguez Bertot, R., & Herrera Garcia, R.S. (2020). Comportamiento agronómico de *Cenchrus purpureus* vc Cuba OM-22 en los llanos venezolanos. *Revista de producción animal* 32 (2) 74-85.
- Moreira-Macías, N.M., Castillo-García, A.A., Romero-Salguero, & E.J., Plua-Montiel, J.A. (2025). Efecto de dos aditivos en la calidad bromatológica de biomasa de pasto Cuba 22 y Botón de oro en distintas proporciones. *Revista agrotecnológica Amazónica*, 5 (2) e829-e829.
- Morocho, G.A., Toalombo, P.A., Guevara, H.P., & Jiménez, S.F. (2023). Assessing the potential and nutritional composition of de hibrid Grass Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum schumach* y *Pennisetum glaucum* L.) at three cutting ages. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/2023041170>
- Morocho Guanquiza Gina Alexandra. (2020). Evaluación del potencial forrajero y Composición nutricional del pasto híbrido cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum schumach* x *Pennisetum glaucum* L.) A Tres edades de corte. Tesis. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.
- Porfirio, M. D., Neres, M. A., Fuhr, C. A., Silva, T. H. da, y Guimarães, I. C. da S. B. (2021). Effects of row spacing and planting density of forage sorghum on dry matter yield, morphologic parameters, nutritive value, and predicted milk yield of dairy cows. *Research, Society and Development*, 10(11), e36101119374. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19374>
- Sandra Alexis Pérez-Estévez, Joel Ventura-Ríos, María de los Ángeles Maldonado-Peralta, Herminio Aniano-Aguirre, Adelaido Rafael Rojas-García. Producción del pasto Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) al variar la altura residual. *Universidad Autónoma de Guerrero*. P 246-251. http://mpbovinatropico.uagro.mx/images/produc_mpbt/PastoCuba.pdf.

MONITOREO DEL PSÍLIDO ASIÁTICO DE LOS CÍTRICOS EN LOS MUNICIPIOS DE PUENTE NACIONAL, PASO DE OVEJAS, LA ANTIGUA Y ÚRSULO GALVÁN, VER.

Alfredo Díaz Criollo¹
Dilan Alberto Balderas Utrera²
Ignacio Garay Peralta³
Jesús Herrera Alarcón⁴

RESUMEN

La citricultura en México es una actividad que genera ingresos para aproximadamente 69 mil familias. El cultivo y comercialización de cítricos genera una gran cantidad de empleos para jornaleros y profesionales en el campo, los empaques, la industria, el transporte, tanto para la comercialización nacional como de exportación. En conjunto este sector demanda anualmente 16 millones de jornales, generando 173 mil empleos directos y 523 mil indirectos (SENASICA, 2022).

Una de las plagas más importantes de la familia de las Rutáceas es el Psílido asiático de los cítricos (PAC) cuyo nombre científico es: *Diaphorina citri*. Actualmente está presente en los 688 municipios del territorio nacional correspondientes a los 27 estados productores de cítricos (Bello, 2023).

El objetivo del trabajo fue determinar la prevalencia del psílido asiático en el cultivo del limón Persa en los municipios de Puente Nacional, Paso de Ovejas, La Antigua y Úrsulo Galván. El monitoreo del Psílido asiático en los cítricos es esencial para prevenir la propagación de la enfermedad HLB, implementar medidas de control adecuadas, proteger la producción y la economía citrícola, y cumplir con las regulaciones fitosanitarias. Se realizó un monitoreo de los árboles de limón Persa en varias parcelas de los municipios mencionados, cuyo rango de árboles fue de 75 a 125 por Municipio. Se encontraron psílicos en las tres etapas: huevo, ninfas y adultos, principalmente en los brotes tiernos de los árboles de limón. Además, en las huertas se registraron manchas grasientas, brotes de patrón y piojo arenoso.

Palabras clave: psílicos, huevo, ninfas, adultos.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. alfredo.dc@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. dilanbalderasutrer@gmail.com

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. ignacio.gp@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jesus.ha@ugalvan.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

El limón es el segundo cítrico más importante en nuestro país, tanto por su consumo en fresco como por su uso industrial. Dentro del contexto mundial México está considerado como el principal país productor en las dos variedades (limón persa y limón mexicano) (SADER, 2018).

En la actualidad, una de las plagas más importantes de la familia de las Rutáceas es el Psílido asiático de los cítricos (PAC) cuyo nombre científico es: *Diaphorina citri Kuwayama*, este insecto ocasiona daños directos e indirectos en la planta hospedante. Los daños directos son causados debido a la alimentación, mientras que los daños indirectos se deben a la transmisión de la enfermedad conocida como Huanglongbing (HLB) ocasionada por la bacteria *Candidatus Liberibacter spp*, dicha enfermedad es considerada la más devastadora a nivel mundial, debido a que no se conoce cura para los árboles que son infectados (Bello, 2023).

Diaphorina citri Kuwayama se considera una plaga cuarentenaria presente, ya que se encuentra en las zonas citrícolas de México causando pérdidas económicas importantes. Actualmente está presente en los 688 municipios del territorio nacional correspondientes a los 27 estados productores de cítricos. Se estima que la superficie comercial con presencia de HLB es del 23% con relación a la superficie nacional (Bello, 2023).

El monitoreo del Psílido asiático en los cítricos es esencial para prevenir la propagación de la enfermedad HLB, implementar medidas de control adecuadas, proteger la producción y la economía citrícola, y cumplir con las regulaciones fitosanitarias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación: el trabajo se realizó en huertas de limón de productores de los Municipios de Úrsulo Galván, Puente Nacional y Paso de Ovejas, Veracruz.

La investigación se llevó a cabo en el período de agosto a diciembre del 2023, dentro del programa de residencia del alumno de 9° semestre de la carrera de Ingeniería en Agronomía del Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván.

Para llevar a cabo el muestreo se seleccionaron 25 árboles al azar por hectárea, dentro de la parcela de los productores participantes, priorizando árboles con hojas jóvenes y aquellos que tengan brotes nuevos. Haciendo 2 visitas por predio, durante los meses de septiembre a noviembre del 2023.

Diseño y análisis

Los datos obtenidos de las diferentes variables fueron capturados en el programa de Excel 2013 para determinar la prevalencia del insecto de acuerdo al municipio y etapa fisiológica.

RESULTADOS

En total se muestrearon 14 parcelas, 325 árboles y se localizaron 93 huevos, 350 ninfas y 1713 adultos del Psílido asiático.

Dentro de los muestreos realizados se encontró mayor cantidad de adultos en los Municipios de Puente Nacional y Paso de Ovejas (Fig. 1).



Fig. 1. Prevalencia del Psílido asiático por municipio. Fuente: Elaboración propia

El Psílido asiático se encontró principalmente en los brotes tiernos de los árboles de limón, es en este lugar donde se ubica mayormente el Psílido en etapa adulta, así como se menciona en el protocolo para el monitoreo de *Diaphorina Citri Kuwayama*, publicado por la FAO (2018): “Los adultos se encuentran en mayores proporciones en brotes tiernos y en el exterior de la copa”.

Existe una mayor presencia del Psílido asiático en el punto cardinal del norte, en comparación con los demás puntos cardinales.

En cuanto a las etapas del insecto, la correspondiente a adulto presento diferencias significativas por Municipio, entre el Municipio de Úrsulo Galván (1) y los Municipios de Paso de Ovejas (3) y Puente Nacional (2) (Fig. 2).

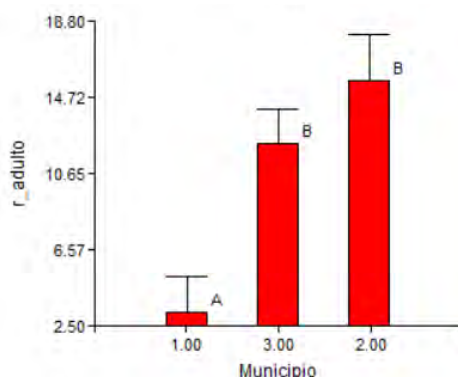


Fig. 2. Prevalencia del psílido adulto por Municipio. Fuente: Elaboración propia

Dentro del estudio, aunque no formaba parte de los objetivos planteados en el trabajo, se pudieron identificar algunas plagas y enfermedades, de interés en la citricultura, como lo fue la presencia de mancha grasienta, minador en hojas, araña roja, pulgones, piojo harinoso. Aclarando que cada una de las parcelas presento por lo menos una o dos de estas afectaciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados encontrados se confirma la presencia del psílido asiático en las huertas de los municipios muestreados por lo que se recomienda a los productores tomar medidas al respecto, ya sea por medio del control químico o biológico, y seguir las recomendaciones fitosanitarias brindadas por las autoridades competentes.

Seguir realizando monitoreos periódicamente para detectar la presencia del Psílido asiático en las huertas de limón, principalmente en aquellas huertas donde se encontró una alta incidencia.

Ayudar a los productores a poder identificar el Psílido asiático cuando este se encuentre en sus huertas de limón, además de poder identificar si un árbol ya se encuentra infectado con la enfermedad de HLB.

De acuerdo con estudios similares realizados en otros lugares (Miranda-Salcedo & López-Arroyo, 2010a), en México, la mayor población del psílido se presentó en agosto. Los factores asociados con la presencia de la plaga están determinados por la humedad relativa y la temperatura, y del manejo de la huerta (poda, fertilización, riegos); éstos promueven el desarrollo de brotes vegetativos, proporcionando a la vez alimento y sitios de oviposición para la plaga (Miranda-Salcedo & López-Arroyo, 2010b).

Por lo que se recomienda Identificar los periodos de brotaciones, para saber cuáles son las temporadas en las que está más presente el insecto.

REFERENCIAS

- Bello, J. (22 de Marzo de 2023). Fertilab. Obtenido de https://www.fertilab.com.mx/AdminFertilab/Notas_Tecnicas/pdf_nota/Psilido_asiatico_de_los_citricos.pdf
- Miranda-Salcedo, M. A., & López-Arroyo, J. I. (2010a) Avance de investigación para el manejo del psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) en Michoacán. In Proceedings of the 3er Congreso Nacional Mitigación del daño ambiental en el Sector Agropecuario de México, México (pp. 73–85).
- Miranda-Salcedo, M. A., López-Arroyo, J. I. (2010b) Fluctuación poblacional de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) y efectividad de insecticidas para su control en Michoacán. *Entomología Mexicana*, 8, 577–582.
- SADER. (18 de Mayo de 2018). Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/limon-mexicano-unico-en-el-mundo>

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS DERIVADOS DE EXCRETAS PECUARIAS PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE VERMICOMPOSTA Y REPRODUCCIÓN DE *Eisenia foetida*

Mercedes Muraira Soto¹
Emely Rodríguez Rendón²
Roberto Panuncio Mora Solís³
Emanuel Pérez López⁴

RESUMEN

Debido a la problemática actual asociada al manejo inadecuado de residuos orgánicos, el vermicomposteo se presenta como una alternativa viable de solución, ya que permite reciclarlos y transformarlos en vermicomposta mediante la acción de *Eisenia foetida*. En la región de la Cuenca del Papaloapan no existen, oficialmente, proyectos enfocados al aprovechamiento de excretas pecuarias, por lo que se desarrolló esta investigación con el objetivo de optimizar la producción de vermicomposta, e incrementar la reproducción y biomasa de *Eisenia foetida*, utilizando excretas de animales domésticos. Se aplicó un diseño completamente al azar con tres tratamientos (equino, ovino y vacuno) y cuatro repeticiones por tratamiento, lo que dio un total de 12 unidades experimentales. Los resultados indicaron que el sustrato equino presentó el mayor porcentaje de eficiencia en la conversión de estiércol en vermicomposta, así como un mayor porcentaje de población de lombrices. Por su parte, el sustrato vacuno mostró un mayor incremento en la biomasa de *Eisenia foetida*. El tratamiento ovino fue excluido del análisis estadístico debido a la presencia de resultados anómalos. En conclusión, en esta región es viable utilizar excretas equinas para incrementar la población de lombrices y la eficiencia de conversión y excretas vacunas para aumentar la biomasa.

Palabras clave: *Eisenia foetida*, excretas pecuarias, sustrato, vermicomposta.

INTRODUCCIÓN

La lombricultura o vermicultura se ha consolidado a nivel mundial como una alternativa eficaz para enfrentar los problemas derivados de la acumulación de residuos orgánicos. Estos desechos, provenientes de distintas actividades humanas y de excretas de especies animales tales como las de bovinos, ovinos y equinos, pueden provocar focos de infección, proliferación de insectos y contaminación del agua y del suelo. En este contexto, la vermicultura representa una opción de

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Cuenca del Papaloapan. mercedes.ms@cpapaloapan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Cuenca del Papaloapan. L21810057@cpapaloapan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Cuenca del Papaloapan. robertopanuncio.ms@cpapaloapan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Cuenca del Papaloapan. emanuel.pl.@cpapaloapan.tecnm.mx

reciclaje sustentable, rápida y de bajo costo de inversión.

El vermicompostaje es un proceso sencillo de descomposición, degradación y estabilización de la materia orgánica (Khatua *et al.*, 2018), mediado por la acción combinada de lombrices y microorganismos bajo condiciones aerobias y mesófilas, con el propósito de convertir residuos orgánicos en vermicomposta, la cual puede utilizarse como nutrimentos que se adhieren al suelo para obtener una buena productividad (Mendoza, 2018).

Eisenia foetida es una de las especies de lombrices más reconocidas y utilizadas en procesos de vermicompostaje, mediante los cuales grandes volúmenes de residuos orgánicos se convierten en abonos de alta calidad. Estos productos contribuyen a reducir el uso excesivo de fertilizantes químicos (Villegas-Cornelio y Laines, 2017). No obstante, en la región de la Cuenca del Papaloapan aún son limitados los estudios relacionados con la producción de vermicomposta, el aumento de biomasa y la reproducción de esta especie empleando excretas de ganado bovino, ovino y equino.

Por otra parte, Das *et al.* (2016) afirman que la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) es la especie más utilizada debido a su amplio rango de tolerancia a la temperatura, contenido de humedad, pH y metales pesados; de igual manera, por su gran potencial para la degradación de diferentes tipos de desperdicios orgánicos y a la calidad de vermicomposta que produce. Molina (2020) expresa que es la más utilizada porque es capaz de convertir casi cualquier tipo de desecho orgánico en vermicomposta y que este abono orgánico mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

La lombriz roja californiana es la más usada en el proceso de vermicompostaje ya que de ellas se obtiene un abono espectacular comúnmente conocido como humus. Este es el resultado del proceso de digestión que hace la lombriz al alimentarse de materia orgánica, transformando residuos en recursos. Su nombre científico es *Eisenia foetida* y es la más utilizada en el proceso de vermicompostaje o lombricompostaje. Son nuestras mejores amigas para regenerar suelos y utilizarlas en agricultura ecológica y todo tipo de cuidado de plantas de manera 100% natural (Brouhon, 2021). Los residuos orgánicos, como el estiércol proveniente de distintas especies animales, representan una importante fuente de patógenos y malos olores, además de contribuir a la contaminación del agua, el aire y el suelo. En este sentido, la vermicomposta se considera una de las alternativas más eficientes para reducir los riesgos de contaminación ambiental. Asimismo, el manejo y tratamiento de estos residuos ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a los problemas ambientales generados por su disposición y manejo inadecuados.

En la actualidad los sectores productivos generan grandes cantidades de residuos orgánicos, como las excretas de animales y residuos agrícolas, principalmente, los cuales pueden tener alguna aplicación, pero en la mayoría de los casos no son reutilizados ni reciclados, sino simplemente

quemados o arrojados a los basureros, sin ningún tratamiento previo, generando todo esto un impacto negativo al medio ambiente en cuanto a contaminación se refiere (Astudillo, 2012). En las investigaciones realizadas por este autor, se ha evidenciado que las lombrices prefieren los estiércoles en comparación con otros materiales, por tal motivo es necesario determinar el orden de preferencia de éstas por los diferentes estiércoles de cada región.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, Cavazos y Muraira (2015) consideran indispensable buscar alternativas de solución; y es aquí precisamente donde la vermicultura juega un papel importante, ya que la lombriz roja californiana recicla los residuos orgánicos transformándolos en abonos de alta calidad, los cuales se aplican al suelo con la finalidad de recuperar su fertilidad en forma natural y económica.

La presente investigación tiene como propósito principal optimizar la producción de vermicomposta y la reproducción de la lombriz roja californiana mediante el uso de diferentes excretas animales disponibles en la región de la Cuenca del Papaloapan. Entre los objetivos específicos se encuentran evaluar y comparar la cantidad de vermicomposta generada cada seis meses en cada tratamiento, determinar cuál presenta la mayor biomasa de lombrices e identificar el tratamiento que favorece una mayor población de *Eisenia foetida*.

Considerando que, en esta región, se generan cantidades considerables de excretas animales, se realizó el presente proyecto de investigación bajo la hipótesis “Las excretas de ganado bovino, ovino y equino son sustratos óptimos para la producción de vermicomposta, reproducción y crecimiento de la lombriz roja californiana”, específicamente con la finalidad de aprovechar dichas excretas en la producción de vermicomposta, para disminuir tanto la contaminación ambiental como para apoyar a los productores agrícolas, de esta región, en cuanto se refiere al incremento en el rendimiento de sus cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este proyecto se realizó en el Área de Lombricultura del Tecnológico Nacional de México campus Cuenca del Papaloapan, situado en Avenida Tecnológico No. 21, ejido San Bartolo, Tuxtepec, Oaxaca, C.P. 68446, durante el período comprendido del 1º de febrero al 30 de julio de 2025. Se localiza entre las coordenadas geográficas 18.092222 de latitud norte y -96.107500 de longitud oeste, a una altura aproximada de 20 metros sobre el nivel del mar (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: INEGI (2020).

Al inicio del proyecto se realizaron visitas a diversas comunidades de la región de la Cuenca del Papaloapan con el propósito de solicitar apoyo a los productores agrícolas y pecuarios para la donación de materia prima. Los sustratos recolectados, utilizados como alimento para la lombriz roja californiana, consistieron en estiércoles de ganado bovino, ovino y equino. Posteriormente, estos materiales fueron trasladados al Área de Lombricultura, donde se eliminaron las impurezas y partículas extrañas presentes. Después, los sustratos se tamizaron con una malla de 5 mm y se sometieron a un proceso de precompostaje durante un mes. Las lombrices utilizadas en el estudio fueron proporcionadas por el Área de Lombricultura del propio Instituto Tecnológico de la Cuenca del Papaloapan.

Se estableció un diseño completamente al azar con tres tratamientos (el T1 consistió en 8 kg de estiércol bovino, el T2 en 8 kg de estiércol ovino y el T3 en 8 kg de estiércol equino) con cuatro repeticiones cada uno (R1, R2, R3 y R4), dando un total de 12 unidades experimentales y 100 lombrices adultas por cada unidad; cada una de éstas estuvo representada por contenedores de plástico resistente, sin perforaciones, con dimensiones de 50 cm X 35 cm X 25 cm de longitud, ancho y altura, respectivamente.

Posteriormente, se efectuó la prueba de caja, para determinar si las lombrices aceptaban como alimento a los sustratos seleccionados.

A continuación, se realizó el conteo de 100 lombrices rojas californianas adultas y la medición de su correspondiente biomasa inicial, utilizando una balanza analítica marca Ohaus con capacidad máxima de 210 gramos; así mismo, se pesaron 8 kg de las excretas para cada una de las repeticiones de los

tres tratamientos, con una pesola marca Macroline con capacidad máxima de 35 kg. Esto con la finalidad de proceder con la siembra de lombrices en los contenedores.

Cada 15 días, durante el tiempo en el que se desarrolló el experimento, se efectuó el conteo de población de lombrices y su correspondiente medición de biomasa. En el Cuadro 1 se muestran el número y biomasa de lombrices, por tratamiento, al inicio del proyecto.

Cuadro 1. Población y biomasa de lombrices en T1, T2 y T3 al inicio del proyecto.

Tratamiento	Población	Biomasa (g)
T1R1	100	42.324
T1R2	100	36.274
T1R3	100	32.746
T1R4	100	28.897
T2R1	100	40.053
T2R2	100	41.600
T2R3	100	30.640
T2R4	100	27.269
T3R1	100	42.889
T3R2	100	35.776
T3R3	100	28.934
T3R4	100	31.306

Fuente: elaboración propia (Muraira-Rodríguez, 2025).

En el Cuadro 2 se presentan las mismas variables dependientes (población y biomasa), pero al final del experimento. Haciéndose la observación de que en este cuadro ya no aparece el tratamiento correspondiente al estiércol de ovino (T2), debido a que, durante el período comprendido entre 15 y 45 días, después de la siembra de las lombrices, se presentó una disminución en la biomasa y posteriormente en su población. Motivo por el cual, se decidió descartar dicho tratamiento, para efectos de análisis estadísticos, debido a que los resultados obtenidos fueron nulos.

Cuadro 2. Población y biomasa de lombrices en T1 y T3 al final del experimento.

Tratamiento	Población	Masa (g)
T1R1	331	25.376
T1R2	409	109.525
T1R3	394	52.234
T1R4	225	61.870
T3R1	2 078	241.584
T3R2	1 801	166.481
T3R3	1 824	223.174
T3R4	259	69.275

Fuente: elaboración propia (Muraira-Rodríguez, 2025).

Las 12 unidades experimentales se revisaron semanalmente para comprobar, empíricamente, la humedad, y cada tercer día se midió la temperatura usando un termómetro marca Brannan (escala de -20°C a 110°C). Con base en el contenido de humedad se realizó la práctica de riego aplicando la cantidad de agua indispensable, y comprobando al tacto el contenido adecuado de ésta, para evitar excesos y no saturar los sustratos; este procedimiento se efectuó desde el inicio del experimento hasta los 45 días, es decir, durante el período que duró el tratamiento constituido por sustrato ovino (T2).

Al finalizar el proceso de vermicompostaje, se tamizó la lombricomposta obtenida y se midió su biomasa correspondiente, empleando una pesola marca Macroline con capacidad de 35 kg. Posteriormente, se calculó la eficiencia de conversión de estiércol en vermicomposta (expresada en porciento), de ambos tratamientos (T1 y T3) con sus respectivas repeticiones, con la finalidad de comparar la cantidad de producto orgánico obtenido a los seis meses, utilizando la fórmula siguiente:

$$EC = \frac{(m_{fp})}{(m_{is})} \times 100$$

En donde:

EC = Eficiencia de conversión (%).

m_{fp} = Masa final del producto (kg).

m_{is} = Masa inicial del sustrato (kg).

RESULTADOS

En el Cuadro 3 se muestra la eficiencia de conversión de estiércol en lombricomposta de ambos tratamientos con sus respectivas repeticiones, durante el proceso de vermicompostaje, en los cuales el estiércol de ganado bovino reportó un promedio de 96.25% y el de equino 98.5%.

Cuadro 3. Vermicomposta obtenida a los seis meses.

Tratamiento	Masa inicial del sustrato (kg)	Masa final del producto (kg)	Eficiencia de conversión (%)
T1R1	8	7.78	97.25
T1R2	8	7.72	96.50
T1R3	8	7.69	96.125
T1R4	8	7.61	95.125
T3R1	8	7.89	98.625
T3R2	8	7.85	98.125
T3R3	8	7.95	99.375
T3R4	8	7.83	97.875

Fuente: elaboración propia (Muraira-Rodríguez, 2025).

Posteriormente, se enviaron las muestras de excretas y de vermicomposta a un laboratorio de análisis para que se les determinaran las características químicas y contenido orgánico, con la finalidad de poder determinar los posibles comportamientos de los sustratos utilizados en el experimento. Con respecto a los resultados de los análisis químicos de vermicomposta, obtenida de los residuos orgánicos de ganado bovino y equino, se pudo establecer que los valores de pH y contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, en las muestras de ambos tratamientos, son apropiados para ser considerados de utilidad en la aplicación del proceso de vermicompostaje (Figura 1).

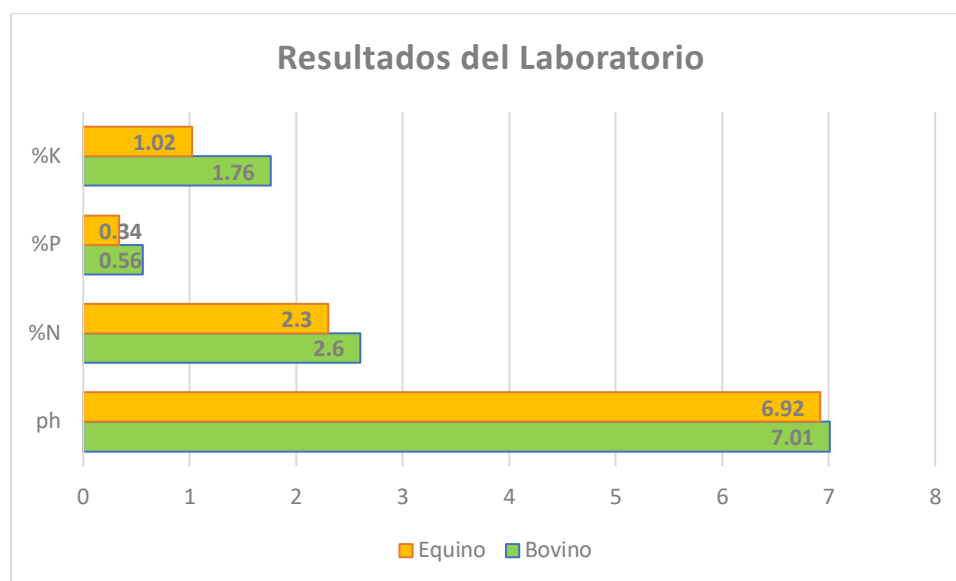


Figura 9. Resultados de pH, nitrógeno, fósforo y potasio.

Para verificar la diferencia de medias de la biomasa de vermicomposta, calculadas a partir de los datos obtenidos de las unidades experimentales, se realizó la Prueba t de Student, la cual se basa en los supuestos de normalidad y homocedasticidad, motivo por el que se procedió a comprobar dichos supuestos. Al aplicar la Prueba de Normalidad, en ambas muestras, los p -valores son mayores a 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula; pero al aplicar la Prueba de Homocedasticidad el p -valor resultante (0.646) es mayor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, por lo que es factible considerar la homocedasticidad en las muestras y al cumplirse ambos supuestos, es también posible aplicar la Prueba t de Student para comprobar la diferencia de medias de la variable biomasa de vermicomposta en los dos tratamientos, dando como resultado un valor $p = 0.0065$.

Lo anterior indica que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula (H_0), con un $\alpha = 0.01$ y un p -valor = 0.0065, por lo que se muestra que el efecto que produce cada uno de los tratamientos (T1 y T3), en la variable biomasa de vermicomposta, es significativamente diferente; presentando una media mayor, el tratamiento al que se le aplicó estiércol de equino (T3).

Para la variable biomasa de lombrices, obtenida a los 75 días después de la siembra, se obtuvo una media de 153.35 para el T1, con una desviación estándar de 34.14 y para el caso del T3 una media de 163.59, con una desviación estándar de 65.80. A continuación, se hicieron las pruebas de bondad de ajuste a la distribución Normal, para los tratamientos T1 y T3, resultando $p > 0.05$, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, que establece la normalidad de los datos, cumpliéndose el supuesto de esta prueba en los datos de ambos tratamientos.

Posteriormente, se realizó también la Prueba de Homocedasticidad, obteniéndose un valor $p = 0.310$, el cual es >0.05 , motivo por el cual no se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad de varianzas, y al cumplirse los supuestos en los que se basa la Prueba t de Student, se aplica dicha prueba de

diferencia de medias y se obtiene un valor $p = 0.396$, siendo > 0.05 , por lo que tampoco se tiene evidencia para rechazar la hipótesis nula, que establece la igualdad de las medias, concluyendo que las diferencias observadas se deben a variables no controladas. Para determinar la influencia del tiempo en la variable biomasa, sólo se consideraron los días 1 a 75, porque el T1 (sustrato bovino) mostró decrecimiento a partir del día 76; por tal motivo, este mismo periodo se consideró para ambos tratamientos, permitiendo que se analizaran durante lapsos similares.

Para ello se utilizó el software Microsoft Excel para realizar el análisis de regresión con los diferentes tipos de línea de tendencia, los cuales son el lineal, exponencial, logarítmico y potencial, siendo el mejor modelo $Y = 35.633 e^{0.0211x}$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8544$, lo que significa que la variable dependiente (masa) del T1 está representada por el modelo de regresión exponencial con un 85.44 % y para el T3 resultó mejor el modelo $Y = 32.645 e^{0.0206x}$ con un $R^2 = 0.7303$, lo cual indica que la variable masa de lombrices de este tratamiento también está representada por el modelo de regresión exponencial con un 73.03 por ciento.

Los resultados que se obtuvieron para la variable dependiente, población de lombrices, a los 75 días después de la siembra, para el T1 fue una media de 676.75 con una desviación estándar de 462.84 y la media del T3 correspondió a un valor de 1155, con una desviación estándar de 761.60. Presentando, ambos tratamientos, alta variabilidad.

Se probaron los supuestos de Normalidad y Homocedasticidad, resultando en todos los casos un valor $p > 0.05$, por lo que no existe evidencia para rechazar las hipótesis nulas de normalidad y homogeneidad de varianzas, respectivamente.

Al cumplirse los supuestos de la Prueba t de Student, se procedió a la aplicación de dicha prueba de diferencia de medias, de la que se obtuvo un valor $p = 0.324$, mayor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, no existiendo evidencia para rechazar la hipótesis nula, que establece la igualdad de medias. Probablemente, estas diferencias observadas se deben a variables no controladas en el experimento, tales como el número de cocones, la reproducción de lombrices y su biomasa inicial, ya que, en especies pequeñas, como es el caso de la lombriz roja californiana, se tiene una variabilidad mayor comparada con las especies de animales grandes.

A continuación, para determinar la influencia del tiempo con respecto a la variable población, se realizó el mismo procedimiento que en el caso de la correlación entre las variables biomasa de lombrices y tiempo, habiéndose comprobado que la variable dependiente, población de lombrices de ambos tratamientos, están mejor representadas por el modelo de regresión exponencial, en el caso del T1 con un coeficiente de determinación $R^2 = 70.01\%$ y para el T3 con $R^2 = 62.73$ por ciento. Asimismo, se realizó un análisis de regresión, entre las variables biomasa y tiempo, para determinar el modelo

al cual se ajustan mejor los datos, o sea calcular el valor del coeficiente de determinación (R^2) de cada uno de los modelos de regresión, concluyendo que la biomasa de *Eisenia foetida*, con un R^2 mayor a las demás, está representada por el modelo de Regresión Exponencial; siendo el modelo ajustado mediante los datos correspondientes al T1 (estiércol bovino), el que explica mejor la variable respuesta (biomasa de lombrices) (Figura 2).

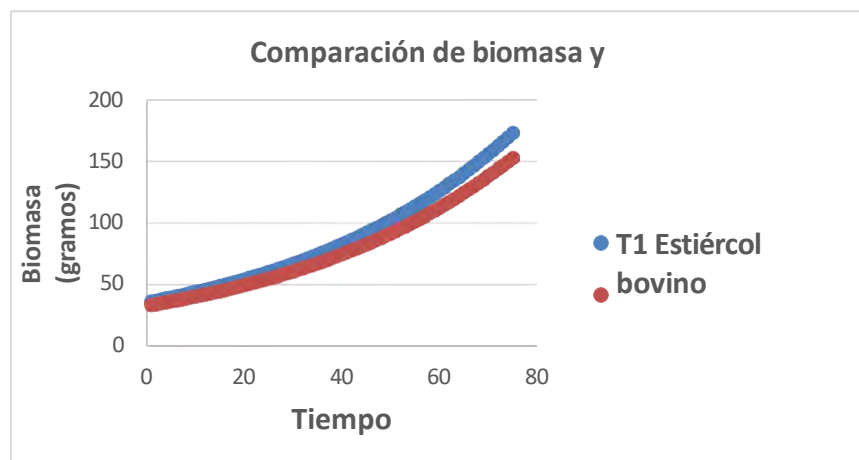


Figura 2. Comparación de biomasa y tiempo de los tratamientos T1 y T3.

En la figura anterior se aprecia claramente que el incremento en masa de lombrices en el T1 (sustrato bovino) fue mayor que en el sustrato equino (T3), a partir de la segunda quincena hasta los 75 días después de haberse efectuado la siembra de *Eisenia foetida*.

Paralelo al objetivo anterior, referente a la variable dependiente número de lombrices, no se pudo rechazar la hipótesis nula (H_0), aun después de haber realizado las pruebas de Normalidad, Homocedasticidad y t de Student, debido a que se presentó mucha variabilidad en las unidades experimentales y esto elevó el error. Dicho error experimental puede deberse a variables no controladas durante el desarrollo del experimento, tales como la edad y tamaño inicial de lombrices, número de cocones y reproducción, puesto que, en especies pequeñas, como es el caso de *Eisenia foetida*, tienen una variabilidad mayor comparada con las especies de animales grandes.

Por último, se efectuó el análisis de regresión entre las variables número de lombrices (población) y tiempo, con la finalidad de determinar el modelo al cual se ajustan mejor los datos, calculando para ello el valor del coeficiente de determinación de los modelos lineal, exponencial, logarítmico y potencial, concluyendo que la población de *Eisenia foetida*, con un R^2 mayor a las demás, está mejor representada por el modelo de Regresión Exponencial (Figura 3).

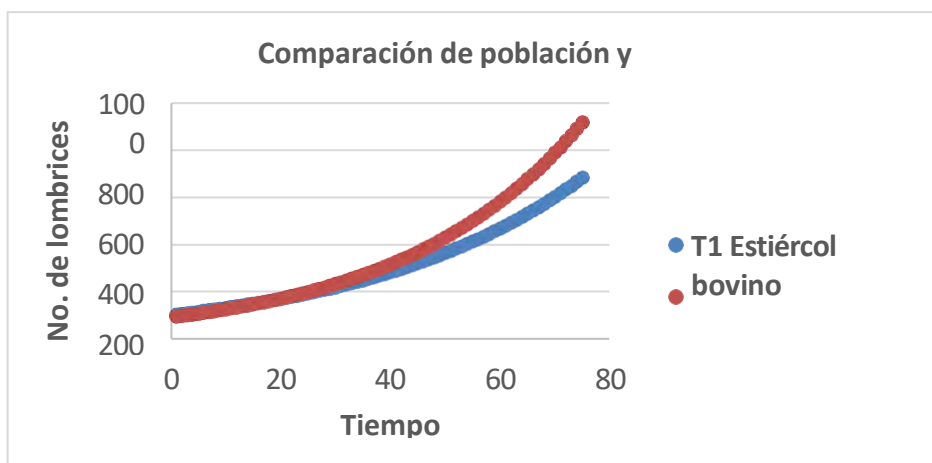


Figura 3. Comparación de número de lombrices y tiempo de los tratamientos T1 y T3.

Como se aprecia en la Figura 3, el crecimiento poblacional de lombriz, en ambos sustratos, es similar hasta el día 40 posterior a la siembra de lombrices, y a partir de ese momento el estiércol equino es el sustrato en el que *Eisenia foetida* desarrolla mejor su capacidad reproductiva, seguido por el sustrato de bovino.

DISCUSIÓN

Antes de efectuarse el experimento, a los tres tipos de excretas animales se les aplicó la prueba de caja, de manera similar a la realizada por Pérez *et al.* (2018). La cual consiste en introducir 50 lombrices en una caja pequeña que contenga el estiércol que se vaya a emplear para su alimentación; luego se esperan 24 horas y si transcurrido este tiempo las lombrices no se escapan de dicha caja y llegan a sobrevivir más de 48 horas, significa que el estiércol ya está en condiciones de poderse utilizar (Zepeda, 2016). Al efectuarse esta prueba a los tres sustratos, ninguno fue rechazado por las lombrices, por tal motivo se inició el experimento. Al respecto, esta investigación también concuerda con la realizada por Piza (2017), ya que, en los tres sustratos, fue superada la prueba de caja.

En lo que se refiere a la variable biomasa de lombrices, existe muy poca información documentada; sin embargo, Canales *et al.* (2020), trabajaron con estiércoles de animales y cáscaras de frutas, habiendo comprobado que el tratamiento que incluyó una mezcla de 20% de estiércol vacuno, 15 % de estiércol ovino, 15% de estiércol equino, 20% de cáscara de sandía, 15% de cáscara de tuna y 15 % de cáscara de plátano, fue el más adecuado para el incremento de cocones y biomasa de lombriz roja californiana.

Arriaga-Ortiz *et al.* (2011), analizaron la dinámica de la población de lombriz roja californiana evaluada en cuatro sustratos pecuarios (estiércol de caballo, conejo, vaca y borrego), y determinaron que la mejor excreta para la reproducción de lombrices fue la de caballo, seguida por la de conejo, siendo de menor reproducción la de vaca y borrego. Estos resultados coinciden con los de la presente

investigación, exclusivamente en que el sustrato de equino fue el mejor para la reproducción de *Eisenia foetida*. Pero no en el caso del estiércol ovino, ya que el tratamiento (T2) se tuvo que descartar en este experimento, debido al alto porcentaje de mortalidad de lombriz roja californiana que se presentó desde los 15 hasta los 45 días de haber iniciado este proyecto.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, el objetivo general de la investigación se cumplió al incrementar la producción de vermicomposta mediante el aprovechamiento de excretas de ganado bovino y equino de la región. Asimismo, se logró aumentar el porcentaje de reproducción de la lombriz roja californiana, lo que permite ofrecer a los productores un abono orgánico, mejorador de suelo, altamente efectivo para elevar el rendimiento de sus cultivos.
- Los autores de esta investigación postulan que la vermicultura constituye una práctica esencial de la agricultura orgánica. Su adopción y transferencia tecnológica por parte de los pequeños y medianos productores de la región representan una estrategia integral orientada a elevar la calidad de vida del sector rural, restaurar la salud edáfica y mitigar los impactos de la contaminación ambiental.
- El sustrato equino (T3) optimizó significativamente el proceso, alcanzando una eficiencia de conversión de estiércol en vermicomposta del 98.5% y el mayor incremento poblacional de lombrices (1391%). Por el contrario, el sustrato bovino (T1) destacó como el medio más favorable para el desarrollo ponderal, induciendo el mayor incremento en la biomasa de *Eisenia foetida* (77.6%).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriaga-Ortiz, J. L., Alvarado-Bárcenas, E., Plancarte-Balderas, F. J., Rangel-Lucio, J. A., García-Rodríguez, J. G., Chablé-Moreno, F., y Torres-Balcázar, A. (2011). Dinámica poblacional de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en cuatro tipos de excretas pecuarias. Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. <https://smbb.mx/congresos%20smbb/queretaro11/TRABAJOS/trabajos/II/carteles/CII-14.pdf>
- Astudillo, C. R. A. (2012). Prefactibilidad técnico-económica del diseño de una planta de lombricultura a base de residuos orgánicos para la producción de abono para la industria de viveros. Tesis de licenciatura. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Brouhon, Q. (2021). Pur Plant. *Todo sobre la lombriz roja californiana*. España: Pur Plant.

- Canales, A., Solís, B. J., Panca, R. J. y Quispe B. L. (2020). Crianza de *Eisenia foetida* (lombriz roja) en diferentes sustratos de desarrollo biológico. *Ecología Aplicada*, 19 (2), 87-92. ISSN 1726-2216 Versión impresa / ISSN 1993-9507. Versión electrónica. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v19i2.1559>.
- Cavazos, E. y Muraira, M. (2015). Residuos orgánicos regionales para la producción de lombricomposta en la Cuenca del Papaloapan. *Ingeniantes*, 2 (1), 30-33. <http://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes2no2vol1/5.%20Residuos%20Org%C3%A1nicos%20Regionales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20lombricomposta%20en%20la%20Cuenca%20del%20Papaloapan.pdf>.
- Das, D., Bhattacharyya, P., Ghosh, Y. B. y Banick, P. (2016). Bioconversion and biodinamics of *Eisenia foetida* in different organic wastes through microbially enriched vermiconversion technologies. *Ecological Engineering* 86, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.11.012>.
- Khatua, C., Sengunpta, S., Balla, V.K., Kundu, B., Chakraborti, A. y Tripathi, S. (2018). Dynamics of organic matter decomposition during vermicomposting of banana Stem waste using *Eisenia foetida*. *Waste Management*, 79 287-295. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.043>.
- Mendoza, E. L. (2018). Efecto de tres dosis de sustratos en la alimentación de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) con estiércol bovino y aserrín descompuesto en Sapecho, Alto Beni. *Revista APTHAPI*, 4, 1128-1138. <https://ojs.agro.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/246>.
- Molina, U. N. (2020). Crianza de *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) en diferentes sustratos de desarrollo biológico. *Ecología Aplicada*. Perú.
- Pérez, M. C., Ávila, I., Laines, J. R. y Villegas, V. M. (2018). Determinación recomendable del pre-compostaje de excreta de borrego para vermicompostaje con *E. foetida*. *Memorias del Congreso Nacional AMICA. Tabasco 2017 (199)*, 1-5. ISSN 2448-6434 <http://www.amica.com.mx/issn/Tabasco/AMI-199.pdf>
- Piza, C. R. (2017). Determinación de la calidad de humus de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) a partir de dos procesos en el tratamiento de alimento ofertado. [Tesis doctoral]. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Villegas-Cornelio, V. M. y Laines, J. R. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (2), 393-406. ISSN: 2007-9230. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/59/55>.
- Zepeda P, R. (2016). Manual para la producción de abonos orgánicos. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental, A.C.

HALLAZGOS PARASITOLÓGICOS EN CERDOS PELONES MEXICANOS Y ESTUDIANTES DE UN PROGRAMA UNIVERSITARIO DE CRIANZA

José Armando Sánchez Salcedo¹

Esli Isai Castro Díaz²

Yhara Betzabe Hidalgo Guapillo³

RESUMEN

El Cerdo Pelón Mexicano (CPM) es un recurso zoogenético nativo amenazado por la reducción poblacional, manejo sanitario limitado y escasa información sobre su estado de salud. El objetivo de este estudio exploratorio fue describir las principales parasitosis detectadas en lechones CPM criados en un sistema universitario de traspatio y, de manera paralela, caracterizar los hallazgos parasitarios intestinales en estudiantes que participaron en actividades de manejo animal dentro de las mismas instalaciones, en el marco de un proyecto formativo orientado al aprendizaje práctico en producción y salud animal dentro de la Facultad. Se realizó un estudio piloto transversal en el que se muestrearon cuatro lechones recién destetados en tres ocasiones, analizándose las heces mediante frotis directo, flotación y la técnica de McMaster. Asimismo, se recolectaron muestras fecales de estudiantes que realizaban prácticas en el área; tras la exclusión de muestras no aptas, 14 muestras restantes se procesaron mediante el método de concentración por flotación de Faust. En los lechones se identificaron ooquistes de *Isospora* spp. y huevos de *Strongyloides* spp., presentando el 75% cargas moderadas y un animal una infestación alta. En las muestras humanas, se detectó el complejo *Entamoeba histolytica*/*E. dispar* en el 64% de los casos y *Trichuris trichiura* en el 7.14%, mientras que el 28.57% resultó negativo. Debido al tamaño reducido de la muestra y a la ausencia de una encuesta epidemiológica, no es posible establecer un vínculo zoonótico u ocupacional directo, por lo que ambos componentes biológicos se consideran hallazgos independientes dentro del mismo entorno. Este estudio aporta información de línea base que justifica la mejora de las prácticas de higiene y el monitoreo preventivo en los sistemas de producción institucionales.

Palabras clave: *Entamoeba*, helmintos, microscopía diagnóstica, protozoarios intestinales, sanidad animal.

¹ Universidad Veracruzana. josesanchez07@uv.mx

² Universidad Veracruzana

³ Universidad Veracruzana

INTRODUCCIÓN

El Cerdo Pelón Mexicano (CPM) es una raza autóctona de importante valor zoogenético que actualmente se encuentra en riesgo de extinción debido a la industrialización de la porcicultura y a diversas presiones socioeconómicas. Introducido hace más de 500 años desde la Península Ibérica, este recurso genético ha mostrado una notable adaptación a las regiones costeras de México, destacando por su rusticidad, tolerancia a condiciones tropicales y relevancia para la seguridad alimentaria en comunidades rurales (Ángel-Hernández et al., 2020). Aunque posee características productivas y adaptativas de interés, los sistemas de crianza en los que comúnmente se desarrolla, particularmente los de traspatio, enfrentan importantes desafíos sanitarios.

Entre estos desafíos, las infecciones parasitarias representan una problemática relevante, ya que pueden ocasionar tasas de mortalidad de hasta el 30% y afectar negativamente parámetros productivos como el crecimiento y la eficiencia de conversión alimenticia (Martínez-Velázquez et al., 2016; García-Munguía et al., 2021). Sin embargo, la información disponible sobre el estado parasitario del CPM continúa siendo limitada, especialmente fuera del sureste de México, región donde se ha concentrado la mayor parte de las investigaciones.

De manera paralela, existe escasa evidencia científica sobre el perfil parasitario de estudiantes universitarios expuestos a actividades pecuarias prácticas en entornos académicos, a pesar del potencial riesgo asociado al contacto frecuente con animales y áreas de producción. Los módulos pecuarios universitarios representan además espacios de enseñanza aplicada, donde la integración entre formación profesional, bienestar animal, bioseguridad y vigilancia sanitaria adquiere relevancia pedagógica y profesional. En este contexto, el presente estudio preliminar tuvo como objetivo describir los hallazgos parasitológicos en lechones de CPM alojados en un módulo universitario de crianza y caracterizar el perfil de parásitos intestinales de los estudiantes que transitan por dicho espacio de trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un estudio piloto exploratorio de corte transversal. Debido a la limitada disponibilidad de animales de esta raza nativa, se utilizaron cuatro lechones CPM recién destetados (un macho y tres hembras), con un peso promedio de 4.8 kg. Los animales se alojaron en un corral de traspatio de 15 × 5 m con piso de tierra y forraje nativo en la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria de la Universidad Veracruzana, Campus Acayucan (Figura 1), como parte de un módulo institucional destinado a actividades académicas, prácticas profesionales y formación en manejo pecuario y sanidad animal.

Se recolectaron muestras fecales (10–30 g) directamente del recto en tres ocasiones: al ingreso, tras la semana de adaptación y después de la aplicación de un protocolo de desparasitación inicial. Las muestras se procesaron mediante frotis directo, flotación y la técnica de McMaster para determinar la carga parasitaria en términos de huevos o ooquistes por gramo (hpg/opg).

Para el componente humano, se solicitaron muestras fecales a 18 estudiantes integrados en las actividades ganaderas del módulo. Tras aplicar los criterios de exclusión (muestras insuficientes, secas o sin conservante adecuado), se seleccionaron 14 muestras aptas que fueron procesadas mediante la técnica de concentración por flotación de Faust. La identificación de las estructuras parasitarias en ambos componentes se realizó mediante microscopía óptica convencional. Dado que el diagnóstico humano se fundamentó exclusivamente en criterios morfológicos por microscopía de luz, los hallazgos coproparasitoscópicos compatibles con amebiasis se clasificaron e informaron estrictamente como "complejo *Entamoeba histolytica/E. dispar*", dada la imposibilidad de diferenciar estas especies sin herramientas moleculares. Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva (frecuencias y porcentajes); no se realizaron pruebas de inferencia estadística debido al tamaño de la muestra.



Figura 1. Se muestra el trabajo directo de estudiantes dentro del módulo y el contacto estrecho con los lechones de CPM. Este estudio involucró participantes humanos; sin embargo, la naturaleza del trabajo no requirió aprobación por un comité de bioética, de acuerdo con las directrices locales e institucionales. Todos los participantes proporcionaron consentimiento informado previo a su participación, y el estudio se llevó a cabo conforme a los principios establecidos en la Declaración de Helsinki. Todos los procedimientos relacionados con el manejo y cuidado de los animales se realizaron en estricto apego a la Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, que establece las especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de animales, bajo la supervisión y asesoría de los profesores participantes en el estudio.

RESULTADOS

El análisis microscópico de las muestras fecales de los lechones de CPM confirmó la presencia de ooquistes de *Isospora* spp. y huevos de *Strongyloides* spp. (Figura 2). Se observaron varios huevos de *Strongyloides* spp. en estadios avanzados de desarrollo, incluyendo formas completamente embrionadas, lo que sugiere ciclos biológicos activos y potencial de transmisión continua dentro del sistema de alojamiento (Figura 3).

El conteo parasitario inicial mediante la técnica de McMaster mostró cargas entre 470 y 3,750 ooquistes por gramo de heces (Ooq/g). De acuerdo con los criterios de clasificación de Rodríguez-Vivas y Cob-Cabrera (2005), el 75% de los lechones ($n = 3$) presentó infestación moderada (470, 670 y 700 Ooq/g), mientras que un lechón (25%) mostró una infestación alta (3,750 Ooq/g).

Para el control antiparasitario se empleó ivermectina subcutánea a dosis de 0.3 µg/kg de peso corporal (Iverfull®, Laboratorios Aranda, México), dirigida principalmente a nematodos como *Strongyloides* spp., y toltrazuril oral a 20 mg/kg (Zuri-Cox® 5%, Laboratorios Aranda, México), orientado al tratamiento de infecciones coccidiales como *Cystoisospora suis*.

En cuanto a las muestras humanas, de las 18 recolectadas en estudiantes, cuatro fueron excluidas por no cumplir con los criterios de calidad para su análisis. En las 14 muestras válidas se identificaron dos organismos parasitarios: un protozoario, el complejo *Entamoeba histolytica*/E. *dispar* (Figura 4), y un helminto, *Trichuris trichiura*. El complejo *Entamoeba histolytica*/E. *dispar* se detectó en el 64% de las muestras analizadas (7/14), mientras que *Trichuris trichiura* estuvo presente en el 7.14% (1/14). El 28.57% restante (4/14) no mostró evidencia de infección parasitaria.



Figura 2. Huevos de *Strongyloides* spp., en los que se puede observar una membrana transparente y una larva completamente desarrollada.



Figura 3. Larva rabbitiforme, que presenta un cuerpo corto y ancho.



Figura 4. Quiste inmaduro de *Entamoeba histolytica*/*E. dispar* que muestra un núcleo periférico único y una gran cantidad de glucógeno.

DISCUSIÓN

El CPM ha sido tradicionalmente manejado bajo sistemas extensivos y de libre pastoreo, con una alimentación basada en frutos, tubérculos, subproductos agrícolas y residuos domésticos, condiciones que reflejan su rusticidad, resistencia a enfermedades y adaptación a ambientes tropicales (Sierra, 2006). No obstante, estas características frecuentemente favorecen una menor implementación de medidas preventivas sanitarias, lo que puede facilitar la permanencia y circulación silenciosa de agentes infecciosos. A pesar de ello, iniciativas de conservación desarrolladas en regiones como

Yucatán, incluyendo asociaciones de criadores, capacitación técnica y generación de productos con valor agregado, han mostrado avances relevantes para la preservación genética in situ y ex situ de la raza (Ángel-Hernández et al., 2019).

Los hallazgos parasitológicos observados en los lechones concuerdan con reportes previos que describen una elevada susceptibilidad durante las primeras semanas de vida. Los coccidios suelen infectar a los lechones en su primera semana, provocando diarrea neonatal y retraso en el crecimiento (Sperling et al., 2022), mientras que las infecciones por *Strongyloides spp.*, adquiridas principalmente vía calostro o por penetración cutánea, pueden ocasionar cuadros clínicos rápidos y severos en animales neonatos (Thamsborg et al., 2017). Los niveles moderados y altos de infestación registrados en este estudio resaltan la necesidad de fortalecer las medidas de bioseguridad, el monitoreo coproparasitoscópico rutinario y la implementación temprana de tratamientos preventivos, con el objetivo de mejorar la salud, el bienestar y la productividad en sistemas de maternidad porcina.

Respecto a los estudiantes, la elevada frecuencia del complejo *Entamoeba histolytica/E. dispar* sugiere rutas generales de exposición fecal-oral, probablemente asociadas con higiene deficiente, consumo de agua o alimentos contaminados, o contacto con superficies contaminadas, dado que los quistes pueden persistir en ambientes húmedos y transmitirse mediante manos, utensilios, herramientas o agua contaminada (Chou y Austin, 2023). Por su parte, la detección de *Trichuris trichiura*, aunque menos frecuente, podría indicar contaminación ambiental persistente, ya que sus huevos requieren un periodo de maduración en el suelo antes de alcanzar infectividad (Viswanath et al., 2023).

Es importante destacar que los parásitos identificados en los porcinos (*Isospora spp.* y *Strongyloides spp.*) y aquellos encontrados en los estudiantes (complejo *Entamoeba histolytica/E. dispar* y *Trichuris trichiura*) corresponden a géneros o especificidades de hospedero diferentes en el contexto del presente estudio, por lo que no existe evidencia de una vía activa de transmisión cruzada entre ambos grupos. Además, debido a que el estudio incluyó un único evento de muestreo humano y no contempló una encuesta epidemiológica estructurada, no es posible establecer asociaciones entre los hallazgos parasitarios en los estudiantes y la exposición ocupacional derivada del contacto con los animales universitarios, condiciones domésticas, fuentes alimentarias o infecciones previas. Por tanto, la detección simultánea de parásitos en porcinos y estudiantes debe interpretarse con cautela y de manera independiente desde la perspectiva epidemiológica.

En conjunto, estos resultados respaldan la importancia de reforzar medidas preventivas y de salud ocupacional en sistemas pecuarios educativos, incluyendo lavado estricto de manos, uso de ropa y calzado exclusivo para áreas pecuarias, manejo seguro de alimentos, programas periódicos de desparasitación y monitoreo sanitario, así como el fortalecimiento de las prácticas generales de bioseguridad. Asimismo, los hallazgos resaltan el valor de los módulos pecuarios universitarios como

entornos de aprendizaje experiencial, donde la vigilancia sanitaria y la prevención de riesgos biológicos constituyen componentes esenciales en la formación integral de estudiantes vinculados a las ciencias agropecuarias.

CONCLUSIONES

Este estudio exploratorio de carácter preliminar documentó la presencia de parásitos intestinales en lechones CPM (*Isospora* spp. y *Strongyloides* spp.) y en estudiantes universitarios (complejo *Entamoeba histolytica*/*E. dispar* y *Trichuris trichiura*) dentro de un mismo espacio institucional. Sin embargo, dadas las marcadas limitantes en el tamaño muestral y el diseño epidemiológico transversal, no se demostró ni se sugiere un vínculo zoonótico o de transmisión cruzada entre ambas poblaciones, tratándose de perfiles parasitarios independientes. No obstante, la coexistencia de estas cargas parasitarias subraya la necesidad de implementar protocolos rigurosos de bioseguridad, saneamiento ambiental, educación en salud y vigilancia coproparasitoscópica regular para proteger tanto el bienestar animal como la salud general de la comunidad universitaria, además de fortalecer el papel de los sistemas pecuarios universitarios como escenarios educativos para la enseñanza aplicada de la sanidad animal, la prevención de riesgos biológicos y las buenas prácticas de manejo.

REFERENCIAS

- Ángel-Hernández, A., García-Munguía, C. A., García-Munguía, A. M., Ortiz-Ortiz, J. R., Sierra-Vásquez, Á. C., & Morales-Flores, S. (2020). Sistema de producción del Cerdo Pelón Mexicano en la Península de Yucatán. *Nova Scientia*, 12(24), 9–29. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2234>
- Chou, A., & Austin, R. L. (2025). *Entamoeba histolytica* infection. En *StatPearls*. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557718/>
- García-Munguía, C., Puentes, C., García-Munguía, A., Haubi-Segura, C., Sánchez-Chiprés, D., & García-Munguía, O. (2021). Evaluación de extractos vegetales para el control de *Oesophagostomum dentatum* en cerdos Pelón Mexicano. *Abanico Veterinario*, 11, e2021-3. <https://doi.org/10.21929/abavet2021.3>
- Martínez Velázquez, G., Román Ponce, S. I., Vélez Izquierdo, A., Cabrera Torres, E., Cantú Covarrubias, A., De la Cruz Colín, L., Durán Aguilar, M., Maldonado Jáquez, J. A., Martínez Silva, F. E., Ríos Utrera, Á., Vega Murillo, V. E., & Ruiz López, F. J. (2016). Morfometría del cerdo de traspatio en áreas rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(4), 431–440. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v7i4.4276>

- Méndez-Medina, R. D., Becerril-Herrera, M., Rubio-Lozano, M. S., & Delgado-Suárez, E. J. (2002). Características de la canal del cerdo Pelón Mexicano, procedente de Mizantla, Veracruz, México. *Veterinaria México*, 33(1), 27–37.
- Ramos-Canché, M. E., Magaña-Magaña, M. Á., Aguilar-Urquiza, E., Pech-Zapata, A., Piñeiro-Vázquez, Á. T., Toledo-López, V. M., & Sanginés-García, J. R. (2020). Óptimos económicos en la cría del cerdo Pelón Mexicano: propuesta de integración para cadena productiva. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(1), e2302. <https://doi.org/10.19136/era.a7n1.2302>
- Rosado-Aguilar, J. A., Rodríguez-Vivas, R. I., Bolio-González, M. E., Gutiérrez-Ruiz, E., Aguilar-Caballero, A. J., Ortega-Pacheco, A., Torres-Acosta, J. F. J., & Gutiérrez-Blanco, E. (2022). El cerdo Pelón Mexicano: alternativa alimenticia y principales zoonosis parasitarias. *BAC*, 15. <https://doi.org/10.56369/BAC.4144>
- Sierra-Vásquez, Á. C., Ortiz-Ortiz, J. R., Bojórquez-Cat, J. C., Canul-Solís, M. A., Tamayo-Canul, J. R., Rodríguez-Pérez, J. C., Sanginés-García, J. R., Magaña-Magaña, M. A., Montes-Pérez, R. C., & Segura-Correa, J. C. (2016). Conservación y uso sustentable del cerdo pelón en Yucatán. *Quehacer Científico en Chiapas*, 11(19), 13–28.**
- Viswanath, A., Yarrarapu, S. N. S., & Williams, M. (2025). *Trichuris trichiura* infection. En *StatPearls*. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507843/>

RASTROJO DE AMARANTO (*Amaranthus* spp) COMO POSIBLE SUSTRATO ADICIONADO CON TEXTURIZANTE E INDUCTOR EN EL LECHO DE FERMENTACIÓN SÓLIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE *Beauveria bassiana*

Gabriel Paredes de Jesús¹
María de Jesús García Gómez²
Oscar Núñez Gaona³

Resumen

El control biológico es componente esencial del manejo integrado de plagas; disminuye de manera significativa el uso de plaguicidas sintéticos empleando organismos vivos y/o sus componentes para controlar plagas en cultivos prioritarios. Evitando el impacto negativo en el ambiente, infertilidad en suelos y salud humana. Los hongos entomopatógenos son adecuados para el control de plagas de distintos órdenes. *Beauveria bassiana* es uno de los más empleados por su alta virulencia y fácil producción. La producción de formulados biológicos a base de hongos entomopatógenos requiere de altas concentraciones de conidios viables y virulentos. La fermentación bifásica, aprovecha residuos agroindustriales como sustratos y/o texturizantes, permitiendo optimizar recursos y reducir costos, e inductores (cutículas de insectos), para incrementar la virulencia del agente. El presente trabajo tiene como propósito evaluar el efecto del inductor (*Tenebrio molitor*) y texturizantes (viruta de madera, cascarilla de café y semilla de hule) en fermentación bifásica, usando un sustrato no convencional (rastroyo de amaranto) para evaluar su efecto sobre la concentración y calidad de conidios de *Beauveria bassiana*, y su potencial su uso en campo.

Palabras clave: *Beauveria Bassiana*, hongos entomopatógenos, rastroyo de amaranto, fermentación bifásica, residuos agroindustriales.

INTRODUCCIÓN

En el año 2021, se identificaron 125 sitios con contaminación por plaguicidas sintéticos en agua superficial, subterránea o suelo, en al menos 23 estados de la república mexicana, donde los 10 con más espacios contaminados fueron: Campeche (19); Guerrero y Sinaloa (16 cada uno); Chiapas (11);

¹ Universidad del Papaloapan. gparedes@unpa.edu.mx

² Universidad del Papaloapan. mjgarcia@unpa.edu.mx

³ Universidad del Papaloapan. oscarnzg@unpa.edu.mx

Sonora (8); Estado de México y Morelos, (6) respectivamente; Coahuila y Guanajuato (5) (Ramírez, 2021).

En el país, las muertes por estos productos son una preocupación de salud pública; en el año 2025, se reportaron más de 1,600 intoxicaciones, principalmente en los estados de Jalisco, Guerrero, Chiapas, Veracruz, y Michoacán (Soto, D. 2025). Moreno-Godínez *et al.*, (2024) publicaron el primer estudio sobre la tasa de mortalidad en México, donde identificaron 7,984 atribuidas a la intoxicación aguda por plaguicidas sintéticos entre el 2000 y 2021.

Una de las alternativas al uso de plaguicidas sintéticos, es el Control biológico, que resuelve problemáticas significativas en la agricultura al ofrecer alternativas sostenibles y seguras a los métodos químicos tradicionales, esto disminuye impactos negativos en la biodiversidad, suelo y agua evitando la muerte de insectos benéficos, que suele ocurrir con el uso inadecuado de plaguicidas sintéticos, reduciendo riesgos para la salud de los trabajadores agrícolas; por ello una menor dependencia de estos productos se traduce en menos exposición y, por lo tanto, menos problemas de salud (Deiss *et al.*, 2025).

Un organismo comúnmente empleado en el control biológico es *Beauveria bassiana*, hongo entomopatógeno perteneciente a la familia de las *cordycipitaceae* que controla a más de 700 especies de insectos plaga, siendo el más utilizado por sus resultados favorables en diferentes cultivos (Intagri, 2016). El primer paso de la infección de *B. bassiana* es mediante la adhesión de los conidios, esporas asexuales, sobre la cutícula del insecto (Cole, 1996). liberando una serie de enzimas, las cuales se encargan de romper la cutícula compuesta por quitina, un polisacárido estructural nitrogenado que le confiere protección (Jiménez-Martínez, 2009).

Los conidios son la parte más importante al momento de llevar a cabo la infección; para su producción, se ha optado por el uso de fermentaciones bifásicas. Uno de los inconvenientes que presenta esta técnica, es la segunda etapa (fermentación en estado sólido); al optar por sustratos poco porosos para el lecho de fermentación, como el arroz, tienden a compactarse, lo que provoca una mala transferencia de calor y oxígeno, ocasionando un crecimiento deficiente. Para evitar esto, se han usado texturizantes, con el fin de aumentar la porosidad en el lecho y permitir el crecimiento óptimo del hongo. Cabe mencionar que una producción mayor de conidios no es sinónimo de calidad, por lo cual, estudios recientes han mostrado que una alternativa para aumentar la calidad de estos es agregar cutícula de insecto como agente inductor con el fin de mantener al hongo bajo estrés obteniendo una producción temprana de enzimas responsables de la penetración de la cutícula. Por lo cual, se plantea que el uso de texturizantes e inductor en la fermentación en estado sólido, empleando restojo de amaranto como sustrato, para evaluar la concentración y calidad de conidios de *Beauveria bassiana*.

MARCO TEÓRICO

Plaguicidas sintéticos y control biológico

Los plaguicidas sintéticos son utilizados para controlar o repeler organismos considerados plaga en cultivos, hogares e industrias. Aunque su uso ha contribuido significativamente al aumento de la productividad agrícola, también representan una fuente importante de contaminación ambiental y riesgo ecológico. Entre los principales efectos adversos se encuentran la contaminación de suelos, agua y aire, así como la afectación de organismos no objetivo, incluidos insectos benéficos, enemigos naturales de las plagas e incluso seres humanos (Landa, 2021; Albert y Benítez, 2005). Además, el uso prolongado e indiscriminado de estos compuestos ha favorecido el desarrollo de resistencia en insectos y la aparición de plagas secundarias, generando desequilibrios ecológicos y problemas agronómicos asociados.

Ante esta problemática, el control biológico se ha consolidado como una alternativa sustentable dentro del manejo integrado de plagas. Este método emplea organismos entomopatógenos, como bacterias, nemátodos y hongos, capaces de reducir las poblaciones de insectos plaga. Los hongos entomopatógenos destacan por su capacidad de infectar directamente a través de la cutícula del hospedero, disminuyendo la probabilidad de generación de resistencia (Nuñez-Gaona *et al.*, 2010; López-Sosa *et al.*, 2018).

Hongos entomopatógenos

Constituyen uno de los grupos más importantes en el control biológico de insectos, ya que prácticamente todos los insectos son susceptibles a ellos. Existen numerosas especies pertenecientes a distintos géneros, entre los que destacan *Metarhizium*, *Verticillium*, *Entomophthora* y *Beauveria* (Monzón, 2021). Dentro de este último, *Beauveria bassiana* es uno de los hongos más estudiados y utilizados debido a su elevada capacidad entomopatógena y amplio rango de hospederos.

Beauveria bassiana es el agente causal de la muscardina blanca en insectos y produce metabolitos tóxicos, como la beauvericina. A pesar de algunos reportes de reacciones alérgicas en animales expuestos a sus conidios, diversos estudios toxicológicos indican que presenta baja patogenicidad en mamíferos y no representa un riesgo significativo bajo condiciones normales de exposición (Evans y Hywel-Jones, 1997). Su eficacia biológica se debe principalmente a la capacidad para infectar al hospedero mediante penetración cuticular. Durante este proceso, el hongo secreta enzimas hidrolíticas, como proteasas, quitinasas y lipasas, encargadas de degradar los componentes estructurales de la cutícula del insecto.

Entre estas enzimas destacan las subtilisinas Pr1 y las tripsinas Pr2, involucradas directamente en la degradación proteica de la cutícula. La proteasa Pr1 es considerada un factor clave de virulencia, ya que participa activamente en la hidrólisis de enlaces peptídicos mediante una triada catalítica

conformada por Aspartato, Histidina y Serina. Se ha demostrado que la supresión de esta enzima reduce significativamente la actividad proteolítica extracelular y la virulencia del hongo (Semenova *et al.*, 2019; Ben-Jie *et al.*, 2020).

Mecanismo de infección

Inicia con la infección de insectos mediante la adhesión y germinación de los conidios sobre la superficie del insecto. Posteriormente, el tubo germinativo penetra el integumento gracias a la acción combinada de enzimas líticas y presión mecánica ejercida por las hifas. Una vez dentro del hospedero, el hongo coloniza el hemocelo, produce toxinas y provoca la muerte del insecto. Finalmente, en una fase saprofítica, el micelio emerge nuevamente hacia el exterior de la cutícula para esporular y dispersarse (Jarrold *et al.*, 2007; Escamilla-Barragán *et al.*, 2022).

La virulencia de *B. bassiana* puede incrementarse mediante el uso de inductores, que estimulan la producción de enzimas asociadas a la infección. Entre ellos destaca *Tenebrio molitor* o “gusano de la harina”, cuya cutícula contiene proteínas estructurales y quitina que actúan como inductores naturales de enzimas hidrolíticas (Gómez *et al.*, 2017; López-Sosa *et al.*, 2018). La cutícula de *T. molitor* está compuesta por proteínas estructurales, principalmente de la familia CPR, relacionadas con la dureza y rigidez del exoesqueleto (Andersen *et al.*, 1997; Willis, 2010).

Producción de hongos entomopatógenos

Para la aplicación de hongos entomopatógenos en campo comercial es necesaria la producción masiva de conidios viables y virulentos. La técnica más empleada es la fermentación bifásica, la cual combina la fermentación en estado líquido (FEL) donde ocurre la activación metabólica del hongo obteniendo una rápida producción de biomasa fúngica (micelio) lo cual servirá como inóculo para la fermentación en estado sólido (FES) donde se sucede el crecimiento del microorganismo sobre una matriz sólida y porosa con bajo contenido de agua libre, permitiendo una adecuada transferencia de oxígeno y el desarrollo del micelio (Aryal, 2022). Diversos materiales lignocelulósicos y cereales, como arroz, maíz, trigo y bagazo de caña, han sido utilizados como sustratos debido a su capacidad para proporcionar soporte físico y nutrientes necesarios para el crecimiento fúngico (Lucero *et al.*, 2024).

No obstante, uno de los principales problemas de la FES es la limitada transferencia de calor y oxígeno ocasionada por la compactación del lecho fermentativo. Para solucionar esta limitante, se han incorporado texturizantes inertes, como viruta de madera o residuos agrícolas, con el objetivo de incrementar el diámetro de poro y mejorar la aireación del sistema. Estudios realizados con hongos entomopatógenos como *Metarhizium anisopliae* e *Isaria fumosorosea* demostraron que el uso de texturizantes favorece la difusión de oxígeno y calor, mejorando las condiciones de crecimiento y producción de conidios (Angel-Cuapio *et al.*, 2016). Asimismo, el aprovechamiento de residuos

agroindustriales en estos procesos contribuye a la valorización de subproductos y a la reducción de costos de producción (Kjærsgaard-Pettersson, 2024).

ANTECEDENTES DIRECTOS

Diversos estudios han demostrado que la fermentación en estado sólido (FES) constituye una estrategia eficiente para la producción de conidios de hongos entomopatógenos, particularmente cuando se optimizan las condiciones físicas y nutricionales del sistema. Angel-Cuapio *et al.* (2016) evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de arroz precocido y viruta de madera como texturizante en la producción de conidios de *Metarhizium anisopliae* e *Isaria fumosorosea*. Los autores obtuvieron una producción máxima de 5.5×10^8 conidios/gramos de sustrato inicial para *M. anisopliae* al sexto día de fermentación, concluyendo que la incorporación de texturizantes mejora la porosidad del lecho fermentativo, favorece la oxigenación y aumenta la producción de esporas.

Por otra parte, el uso de inductores derivados de insectos ha mostrado efectos positivos sobre la producción de enzimas relacionadas con la virulencia de *Beauveria bassiana*. Jiménez-Alejandro *et al.* (2016) evaluaron el efecto de cutículas de camarón, chapulín y *T. molitor* sobre la producción de quitinasas por *B. bassiana* en fermentación líquida. Los resultados mostraron una elevada producción de endoquitinasas y exoquitinasas a pH 3 y 25 °C, alcanzando actividades de hasta 4370.6 mU/mL a las 48 h cuando se emplearon sustratos quitinosos derivados de insectos. Estas enzimas participan directamente en la degradación de la cutícula del huésped y representan uno de los principales mecanismos de infección del hongo.

Asimismo, López-Sosa *et al.* (2018) evaluaron dos cepas de *B. bassiana* utilizando *T. molitor* como inductor, rastrojo de amaranto y arroz como sustratos en FES. Los autores reportaron que la cepa Bb 885.2 alcanzó una producción de 3.56×10^9 conidios/g de sustrato en una proporción 85:15 sustrato/inductor, concluyendo que el uso de rastrojo de amaranto permitió obtener conidios con niveles de virulencia comparables a los producidos en arroz.

En conjunto, estos estudios destacan la importancia de factores como la aireación del sistema, el uso de residuos agroindustriales y la incorporación de inductores para mejorar la producción y virulencia de conidios de hongos entomopatógenos. Sin embargo, hasta el momento no se han reportado investigaciones que integren simultáneamente el uso de texturizantes, inductores y rastrojo de amaranto como sustrato en FES para la producción de *B. bassiana*.

En este contexto, la búsqueda de alternativas sustentables al uso de insecticidas sintéticos resulta prioritaria debido a los efectos negativos asociados a su aplicación, entre ellos la contaminación ambiental, la pérdida de fertilidad de los suelos y los riesgos para la salud humana. El control biológico representa una estrategia ambientalmente amigable y eficaz para reducir el uso de estos compuestos.

Dentro de este enfoque, los hongos entomopatógenos, especialmente *Beauveria bassiana*, destacan por su capacidad para infectar una amplia variedad de insectos plaga y por su relevancia en programas de manejo integrado de plagas.

La producción de formulaciones biológicas eficientes requiere obtener conidios con alta viabilidad y virulencia, características que pueden potenciarse mediante la optimización de la FES. La incorporación de texturizantes favorece la transferencia de oxígeno y la disipación de calor, mientras que el uso de inductores puede estimular la síntesis de enzimas asociadas con la infección del hospedero. Por ello, evaluar de manera conjunta estos factores utilizando residuos agroindustriales como el rastrojo de amaranto representa una alternativa prometedora para mejorar la producción sustentable de *B. bassiana* y contribuir al desarrollo de bioproductos con mayor eficiencia para el control biológico de plagas.

HIPÓTESIS Y OBJETIVO GENERAL.

El empleo de texturizante e inductor en la parte sólida de la fermentación bifásica, mejorará la concentración y calidad de los conidios de *Beauveria bassiana*.

OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el efecto del texturizante e inductor sobre la concentración y calidad de los conidios de *Beauveria bassiana* en fermentación bifásica.

METODOLOGÍA.

***Beauveria bassiana*.**

Se empleará la cepa de *Beauveria bassiana* DS3.17, perteneciente al cuerpo académico de Biotecnología Sustentable de la Universidad del Papaloapan Campus Tuxtepec. Se reactivará en cajas Petri con agar dextrosa Sabouraud (SDA) y se conservará a 4°C con la finalidad de mantener la homogeneidad genética durante todo el estudio.

Fermentación en estado líquido.

La FEL se llevará a cabo en matraces de 250 mL utilizando caldo Sabouraud dextrosa (SD) al 4% enriquecido con 0.05% de extracto de levadura. Se inocularán 1.5 mL de una suspensión de conidios con una concentración de 1×10^6 conidios/mL. Los cultivos se incubarán a temperatura ambiente con agitación intermitente de 4 horas durante 7 días. Se tomará muestra cada 24 h y la concentración de conidios se determinará mediante conteo en Cámara de Neubauer empleando un microscopio óptico a 40x (Núñez-Gaona, 2009; Lopez-Sosa, 2021).

Sustrato.

Se empleará rastrojo de amaranto obtenido de productores del estado de Tlaxcala, cosechado en el mes de marzo. Este será secado en estufa a 60°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante. Posterior a ello, se triturará y tamizará a través de mallas #18 y #12 para así obtener el material retenido en la malla #12, con tamaño de partícula menor a 1.5 mm, pero mayor a 1 mm. Este será almacenado en bolsas herméticas selladas al vacío hasta su evaluación nutrimental y posterior uso como sustrato de fermentación.

Análisis proximal.

Se llevará a cabo el análisis proximal del rastrojo de amaranto de acuerdo a las normas oficiales mexicanas de los métodos correspondientes.

Determinación de nitrógeno total.

Para determinar la relación Carbono/Nitrógeno (C:N) del rastrojo de amaranto se determinará el porcentaje de nitrógeno total de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-155-SCFI-2012.

Determinación de cenizas.

Se realizará siguiendo el método descrito en la norma mexicana NMX-F-607 NORMEX-2013.

Determinación de humedad.

Para la determinación de humedad, se empleará el método rápido en termobalanza de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma mexicana NMX-F-428-1982.

Texturizante.

Como texturizante se empleará viruta de madera, cascarilla de café y testa de semilla de hule. El aserrín fue obtenido de comercio local “Maderería del Papaloapan” de San Juan Bautista Tuxtepec Oaxaca; la cascarilla de café fue donada por productores del municipio de Cerro Armadillo Grande, en Valle Nacional Oaxaca de la empresa local “HR-CAFÉ” y las semillas de hule fueron donadas del “Vivero San Miguel” del ejido de Santa Sofía. Una vez obtenido el material, será sacado y triturado, posterior a ello se tamizará a través mallas #10 y #18 para obtener el material retenido en la malla 18, asegurando un tamaño de partícula menor a 2 mm, pero mayor a 1.5 mm. Una vez obtenido será esterilizado y almacenado al vacío hasta su uso. (Cuapio *et al.*, 2016).

Inductor.

Se empleará como inductor cadáveres de *T. molitor* adulto; estos serán procesados con mortero, hasta obtener polvo fino. Posterior a ello, se almacenarán en recipientes herméticos hasta su uso (López-Sosa., 2018).

Fermentación en estado sólido.

Se llevará a cabo en cajas de plástico (10cm L x 10cm A x 4cm H) usando 20 g de sustrato; se agregarán 26 mL de agua destilada para ser llevadas a esterilización en autoclave; una vez

esterilizadas serán inoculadas en condiciones asépticas con 26 mL de inóculo con una concentración de 2×10^9 conidios/mL y se incubarán a temperatura ambiente durante 8 días (López-Sosa *et al.*, 2023). Cada unidad experimental se realizará por triplicado.

Obtención de muestras.

Las muestras serán tomadas en cantidades representativas (± 1 g) de cada tratamiento en condiciones estériles cada 24 h, colocándolas en tubos cónicos de 50 mL. Las muestras se usarán para determinar, humedad y producción de conidios (López-Sosa, 2021).

Cuantificación de conidios.

Se realizará una suspensión de conidios agregando 20 mL de agua destilada estéril previamente homogenizada. Una vez realizada la suspensión, se tomarán alícuotas de 1 mL y se realizarán diluciones seriales de 1×10^1 a 1×10^3 para facilitar el conteo en un hematócrito (cámara de Neubauer) empleando un microscopio óptico a 40x (Núñez-Gaona, 2009; López-Sosa *et al.*, 2023).

Cuantificación de la viabilidad.

Al término de la fermentación sólida se tomarán muestras representativas (3 g) de cada tratamiento y se realizarán diluciones seriales con un volumen de 10 mL hasta alcanzar concentraciones de 50-300 conidios en 500 μ L de agua destilada estéril; este volumen se inoculará en cajas Petri, empleando el medio de cultivo SDA. Las cajas serán incubadas a temperatura ambiente; 24 h después deberá ser observada la aparición de colonias. El porcentaje de viabilidad se calculará mediante la siguiente ecuación (1) (López-Sosa, 2021).

$$(1) \% \text{Viabilidad} = \left(\frac{\text{colonias formadas}}{\text{conidios inoculados}} \right) \times 100$$

RESULTADOS PRELIMINARES.

Reactivación de *Beauveria bassiana*.

Se llevó a cabo la reactivación de *B. bassiana* DS3.17 y se cuantificó su porcentaje de viabilidad tras ser resembradas en placas Petri obteniendo un porcentaje de viabilidad del 98%. Este parámetro constituye un aspecto central para garantizar su eficacia como agente de control biológico siendo el más relevante, dado que la efectividad del biocontrolador depende directamente de su germinación y capacidad de infección. Estudios previos han demostrado que la producción en FES tiende a favorecer la formación de conidios con alta resistencia y estabilidad, mientras que la FEL puede potenciar la síntesis de metabolitos secundarios (Jackson *et al.*, 2003).

Análisis proximal.

El análisis proximal del rastrojo de amaranto (Tabla 1) mostró un porcentaje de humedad y cenizas del 6.92 % y 6.16 % respectivamente. Estos valores son relevantes para evaluar su potencial como

sustrato en procesos de fermentación sólida ya que un bajo contenido de humedad constituye una ventaja significativa que favorece la estabilidad del material durante el almacenamiento y reduce el riesgo de proliferación de microorganismos contaminantes. En el contexto de la fermentación sólida, la humedad inicial del sustrato se ajusta de manera controlada al momento de la inoculación, por lo que un material con poca agua libre permite mayor precisión en la preparación del medio (Pandey, 2003). Por otra parte, el porcentaje de cenizas indica la posible presencia de minerales como calcio, magnesio, potasio y fósforo, los cuales pueden actuar como cofactores enzimáticos y contribuir al metabolismo del hongo (Raimbault, 1998). Aunque este aporte mineral es positivo, no sustituye la necesidad de suplementar el sustrato con fuentes adicionales de carbono y nitrógeno para optimizar la esporulación y la producción de metabolitos secundarios. Concordando con lo reportado por López-Sosa (2021), la caracterización proximal del rastrojo de amaranto confirma que este residuo agrícola no es un material inerte, sino que posee propiedades que lo hacen viable como sustrato. Sin embargo, para alcanzar altos rendimientos en la producción de conidios de *B. bassiana*, es necesario complementar el rastrojo con otros insumos ricos en carbohidratos y proteínas, de modo que se logre un balance adecuado en la relación C:N. Los resultados obtenidos permiten concluir que el rastrojo de amaranto constituye un sustrato prometedor para la fermentación sólida, al combinar estabilidad física con un aporte mineral moderado. No obstante, su uso óptimo requiere estrategias de suplementación que potencien la capacidad del hongo para producir estructuras infectivas de alta calidad, lo cual se alinea con la propuesta de aprovechar residuos agroindustriales en esquemas de economía circular y biotecnología aplicada al control biológico.

Tabla 4. Análisis proximal del rastrojo de amaranto.

Sustrato	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteínas (%)
Rastrojo de amaranto	6.923 ± 0.140	6.168 ± 0.250	±

PERSPECTIVAS

Estos resultados representan un avance preliminar dentro de las actividades aún pendientes por realizar; sin embargo, con base en lo obtenido hasta el momento, es posible considerar que el lecho de fermentación sólida funcionará de manera eficiente, de forma similar a lo reportado por Lopez-Sosa *et al.* (2023), quienes concluyen que el rastrojo de amaranto puede generar conidios de calidad comparable a los obtenidos utilizando arroz precocido como sustrato. Aunado a ello, se espera que la incorporación de texturizantes inertes, como viruta de madera, cascarilla de café o testa de semilla de hule, incremente de manera significativa la estructura y porosidad del lecho de fermentación, favoreciendo así una mayor producción de unidades infectivas.

De igual forma, la adición de cutícula de *T. molitor* propiciara un ambiente de estrés controlado que induzca la producción de enzimas necesarias para la ruptura y degradación de la cutícula. Como resultado, se espera obtener esporas con elevada calidad biológica.

No obstante, la capacidad de infección y virulencia deberá evaluarse mediante bioensayos posteriores. Aunque la FES garantiza altos rendimientos de conidios, es indispensable comprobar que estos mantengan la capacidad de penetrar la cutícula del insecto huésped y expresar enzimas como proteasas y quitinasas, fundamentales en el proceso de infección.

En conclusión, la viabilidad de *B. bassiana* en FEL y FES depende de diversos factores, entre los que destacan la calidad del sustrato, el balance nutricional, la resistencia de los conidios y la expresión de enzimas asociadas con la virulencia. En este sentido, la caracterización proximal del rastrojo de amaranto constituye un primer acercamiento para evaluar su potencial como sustrato; sin embargo, la validación de su viabilidad requiere pruebas complementarias que permitan garantizar la eficacia del hongo bajo condiciones de campo.

REFERENCIAS

- Albert, L. A., y Benítez, J. A. (2005). Impacto ambiental de los plaguicidas en los ecosistemas costeros. En A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.), *Golfo de México: Contaminación e impacto ambiental. Diagnóstico y tendencias* (2.^a ed., pp. 157–176). Universidad Autónoma de Campeche; Universidad Nacional Autónoma de México; Instituto Nacional de Ecología.
- Andersen, S. O., Rafn, K., y Roepstorff, P. (1997). Sequence studies of proteins from larval and pupal cuticle of the yellow meal worm, *Tenebrio molitor*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 27(2), 121–131. [https://doi.org/10.1016/s0965-1748\(96\)00076-8](https://doi.org/10.1016/s0965-1748(96)00076-8)
- Angel-Cuapio, A., y Loera, O. (2016). Uso de residuos agroindustriales como texturizantes para la producción de hongos entomopatógenos en cultivo en estado sólido. *Mexican Journal of Biotechnology*, 1(1), 21-33.
- Aryal, S. (2022, 18 de febrero). *Solid State Fermentation (SSF)*. Microbe Notes. Recuperado 10 de enero de 2026, de <https://microbenotes.com/solid-state-fermentation-ssf/>
- Ben-Jie Gao, Ya-Ni Mou, Sen-Miao Tong, Sheng-Hua Ying y Ming-Guang Feng (2020) Subtilisin-like Pr1 proteases marking the evolution of pathogenicity in a wide-spectrum insect-pathogenic fungus, *Virulence*, 11:1, 365-380, DOI: 10.1080/21505594.2020.1749487.
- Cole, G. T. (1996). *Basic biology of fungi*. En S. Baron (Ed.), *Medical Microbiology* (4.^a ed., cap. 73). University of Texas Medical Branch at Galveston. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK8099/>

- Deiss, F., y Edgington, S. (2025, 20 de agosto). *Manejo integrado de plagas: cómo funciona y cuáles son sus beneficios*. BioProtection Portal. Recuperado 12 de enero de 2026, de <https://bioprotectionportal.com/es/resources/integrated-pest-management-use-and-its-benefits/>
- Dirección General de Normas. (1982). *Alimentos - Determinación de humedad en productos alimenticios (método rápido de la termobalanza)* (NMX-F-428-1982). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Ramírez E. (2021, October 14). *En México, 125 sitios contaminados por plaguicidas* Contralínea. Contralínea. <https://contralinea.com.mx/interno/semana/en-mexico-125-sitios-contaminados-por-plaguicidas/>
- Escamilla Barragán, F., Nava Galicia, S. B., y Bibbins, M. (2022). *Los hongos entomopatógenos, aliados de la agricultura sustentable en el control de plagas*. *Frontera Biotecnológica*, (septiembre-diciembre). Recuperado 14 de enero de 2026, de https://www.researchgate.net/publication/378977516_Los_Hongos_Entomopatogenos_Aliados_de_la_Agricultura_Sustentable_en_el_Control_de_Plagas
- Evans, H. C., y Hywel-Jones, N. L. (1997). Entomopathogenic Fungi. *World Crop Pests*, 3–27. [https://doi.org/10.1016/s1572-4379\(97\)80075-9](https://doi.org/10.1016/s1572-4379(97)80075-9)
- Gómez, C., Amaya, I., Reynaldo, Raúl Rodríguez-Herrera, y Aguilar, C. N. (2017). Biomasa de *Tenebrio molitor* como inductor de lipasas y proteasas producidas por *Paecilomyces fumosoroseus*. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2(2), 142–150. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.142>
- Intagri S.C. (2016). *Beauveria bassiana en el control biológico de patógenos*. Intagri. Recuperado 12 de enero de 2026, de <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/beauveria-bassiana-en-el-control-biologico-de-patogenos/>
- Jackson, M. A., McGuire, M. R., y Lacey, L. A. (2003). Production of *Beauveria bassiana* conidia in liquid culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 61(4), 377–382.
- Jarrold, S. L., Moore, D., Potter, U., y Charnley, A. K. (2007). *The contribution of surface waxes to pre-penetration growth of an entomopathogenic fungus on host cuticle*. *Mycological Research*, 111(2), 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.10.007>
- Jiménez Martínez, E. (2009). *Entomología* (Versión publicada). Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. <https://repositorio.una.edu.ni/2458/1/nh10j61e.pdf>
- Jiménez-Alejandro, S. E., Nuñez-Gaona, Ó., y Ramírez-Coutiño, L. P. (2016). Fermentación líquida como herramienta biotecnológica para la obtención de quitinasas con *Beauveria bassiana*. *Biotecnología y Sustentabilidad*, 1(1), 139-139.

- Kjærsgaard-Pettersson, J. (2024, 16 de octubre). *Solid State Fermentation – Part 1: Processes and application*. NIRAS. Recuperado 14 de enero de 2026, de <https://www.niras.com/insights/solid-state-fermentation-part-1/>
- Landa, E. (2021). *Toxicología de plaguicidas sintéticos*. Tetengo. Recuperado 14 de enero de 2026, de <https://www.tetengo.com.mx/blog/toxicologia-de-plaguicidas-sinteticos/>
- López-Sosa D, García-Gómez M de J, CarrilloAhumada J, Núñez-Gaona O. 2023. Production, virulence, and viability of *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. conidia obtained by fermentation of amaranth stubble. *Agrociencia*. doi.org/ 10.47163/agrociencia.v57i6.2929
- López-Sosa, D., de, M., y Núñez-Gaona, O. (2018). Análisis cualitativo de la producción de enzimas de *Beauveria bassiana* en fermentación sólida utilizando un inductor. *Mexican Journal of Biotechnology*, 3(3), 26–35. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2018.3.3.26>
- Lucero, J., Manzano, J., Loaiza, I., y Orellana, Y. (2024). Producción de *Beauveria bassiana* para la formulación de bioplaguicidas. *La Granja*, 39(1), 113–129.
- Monzón, C. (2021). Producción y uso de hongos entomopatógenos.
- Moreno-Godínez, M. E., Flores-Alfaro, E., Parra-Rojas, I., Medina-Díaz, I. M., Rojas-García, A. E., Avilés-Ramírez, C., Campos-Viguri, G., y Ramírez-Vargas, M. A. (2024). Trends on deaths from acute pesticide poisoning in Mexico, 2000-2021. *Revista brasileira de epidemiologia = Brazilian journal of epidemiology*, 27, e240001. <https://doi.org/10.1590/1980-549720240001>
- NMX-F-607-NORMEX-2013. 2013. Determinación de cenizas en alimentos. Normas mexicanas.
- NOM-155-SCFI-2012. 2012. Análisis de agua - medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Norma mexicana.
- Núñez-Gaona, O., Saucedo-Castañeda, G., Alatorre-Rosas, R., y Loera, O. (2010). Effect of moisture content and inoculum on the growth and conidia production by *Beauveria bassiana* on wheat bran. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(4), 771–777. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132010000400004>
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2–3), 81–84. [https://doi.org/10.1016/s1369-703x\(02\)00121-3](https://doi.org/10.1016/s1369-703x(02)00121-3)
- Raimbault, M. (1998). General and microbiological aspects of solid substrate fermentation. *Electronic Journal of Biotechnology*, 1(3), 0–0. Retrieved from <https://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v1n3-9>
- Semenova, T.A., Dunaevsky, Y.E., Beljakova, G.A., Belozersky, M.A., Extracellular peptidases of insect-associated fungi and their possible use in biological control programs and as pathogenicity markers, *Fungal Biology*, <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2019.11.005>.

- Soto, D. (2025, September 29). *Gobierno federal prohíbe 35 plaguicidas mientras otros altamente peligrosos siguen autorizados*. ADNPolítico; Expansión News. <https://politica.expansion.mx/mexico/2025/09/28/gobierno-prohibe-plaguicidas-otros-siguen-autorizados>
- Willis, J. H. (2010). Structural cuticular proteins from arthropods: Annotation, nomenclature, and sequence characteristics in the genomics era. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 40(3), 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2010.02.001>

DESARROLLO DE POPOTES ECOLÓGICOS MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA PIÑA “ECODRINK”

Humberto Fregoso Bernabe¹

Montserrat Acosta Cadenas²

Litziany Sugahir Perez Hernández³

Daniel Utrera López⁴

RESUMEN

EcoDrink es un popote ecológico, biodegradable y comestible elaborado a partir de residuos de piña, diseñado como una alternativa sostenible a los popotes de plástico de un solo uso. El proyecto surge como respuesta a la problemática ambiental generada por los residuos plásticos que contaminan ecosistemas terrestres y acuáticos. La propuesta aprovecha subproductos agroindustriales mediante un proceso de transformación basado en biopolímeros naturales obtenidos de la fibra y cáscara de piña, combinados con ingredientes de origen natural que permiten obtener un producto funcional, seguro y amigable con el medio ambiente. EcoDrink mantiene su resistencia en bebidas frías y contribuye a la reducción de residuos contaminantes, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento responsable de recursos. Asimismo, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 y 12, relacionados con ciudades sostenibles y producción responsable. Además de ofrecer beneficios ambientales, impulsa el desarrollo de soluciones innovadoras con potencial de comercialización y valor agregado para el sector agroindustrial.

Palabras Clave: Popote ecológico, residuos de piña, Biodegradable, Economía circular, Sustentabilidad

INTRODUCCION

En la actualidad, el uso de popotes de plástico de un solo uso representa una problemática ambiental significativa, ya que estos productos tardan cientos de años en degradarse y generan contaminación en suelos y cuerpos de agua, afectando negativamente a los ecosistemas y a la calidad de vida en las comunidades. Aunque existen alternativas como los popotes de papel, estas presentan limitaciones en resistencia y durabilidad, lo que reduce su funcionalidad y aceptación por parte de los consumidores.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. montserrat.ac@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Humberto.fb@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. L24880138@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Daniel.ul@ugalvan.tecnm.mx

Esta situación se relaciona directamente con la ODS 12: Producción y Consumo Responsable, la cual promueve el uso eficiente de los recursos, la reducción de residuos y el desarrollo de productos sostenibles. Asimismo, se vincula con:

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, ya que la disminución de residuos contaminantes contribuye a mejorar el entorno urbano, la gestión de desechos y la salud ambiental de las comunidades.

En este contexto, surge una oportunidad de negocio enfocada en crear soluciones innovadoras que sustituyan los productos contaminantes por opciones más amigables con el medio ambiente. El aprovechamiento de residuos de piña permite transformar un desecho agroindustrial en un producto útil, fomentando la economía circular y reduciendo el impacto ambiental.

De esta manera, se identifica una oportunidad para desarrollar un popote ecológico, comestible y biodegradable que responda a las nuevas demandas del mercado, promoviendo hábitos de consumo responsables, fortaleciendo comunidades sostenibles y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

DISEÑO METODOLÓGICO

La solución propuesta por ECODRINK consiste en el desarrollo de un popote ecológico y comestible elaborado a partir de residuos de piña, mediante un proceso de transformación basado en la obtención de un biopolímero natural. El proceso técnico inicia con la recolección, selección, limpieza y trituración de la cáscara y fibra de piña. Posteriormente, estos residuos se someten a una mezcla con almidón de maíz, glicerina vegetal y agentes estabilizantes naturales,

formando una matriz homogénea. Esta mezcla se calienta a temperatura controlada hasta obtener una consistencia gelatinosa y moldeable. Luego, se procede al moldeado en forma de popote mediante el uso de varillas o moldes cilíndricos.

El producto se coloca en refrigeración durante 5 minutos a una temperatura aproximada de 4 °C. Posteriormente, se retira y se vuelve a colocar en el refrigerador durante un periodo de 1 hora, manteniéndose a la misma temperatura, con el fin de lograr su estabilización, firmeza y resistencia estructural.

El resultado es un popote biodegradable, comestible, seguro para el organismo humano y apto para bebidas frías o a temperaturas no mayores a 28 °C

En cuanto a la normatividad aplicable, el proyecto se rige por disposiciones en materia de salud, higiene y medio ambiente. En México, se considera la NOM-251-SSA1-2009, que establece las prácticas de higiene para el proceso de alimentos y bebidas, garantizando la inocuidad del producto. Asimismo, se toma en cuenta la NOM-120-SSA1-1994,

Referente a prácticas sanitarias en la preparación de alimentos. En el ámbito ambiental, se alinea con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, promoviendo el aprovechamiento de residuos orgánicos y la reducción de desechos. De esta manera, la solución cumple con la normatividad vigente, asegurando calidad, seguridad y sostenibilidad.



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración propia.

PROPIEDAD INTELECTUAL

Se buscó el nombre comercial ECODRINK en la página Marcanet y no se encontró ninguna coincidencia, el nombre ECODRINK es compuesto ECO hace referencia a la parte ecológica y DRINK que viene del inglés que significa bebida que hace referencia al uso que tiene el popote, el eslogan **"El futuro del popote empieza hoy"** hace referencia a la idea de que el producto representa una innovación ecológica que ya está disponible en el presente. Transmite que no es necesario esperar para adoptar soluciones sostenibles, sino que el cambio puede comenzar desde ahora. De esta manera, invita a las personas a modificar sus hábitos de consumo y optar por alternativas más responsables con el medio ambiente. En esencia, el mensaje comunica que el futuro sostenible inicia con las decisiones que se toman hoy. La piña en el logotipo hace ilusión a la materia prima de la que está elaborado el popote.



RESULTADOS

Consiste en ofrecer un popote ecológico y comestible, elaborado a partir de residuos de piña mediante un proceso de biopolimerización natural, como una alternativa sostenible, funcional y segura frente a los popotes de plástico y papel.

Esta propuesta responde directamente a la problemática ambiental generada por los plásticos de un solo uso, los cuales contaminan ecosistemas, afectan la biodiversidad y deterioran la calidad de vida en las comunidades. Su principal

atributo es ser biodegradable y apto para el consumo humano, lo que permite reducir el impacto ambiental sin comprometer la experiencia del usuario. Además, presenta mayor resistencia que los popotes de papel, manteniendo su

estructura y funcionalidad durante su uso en bebidas frías o a temperaturas no mayores a 28 °C, sin deformarse ni desintegrarse.

Esta propuesta se alinea con la ODS 12: Producción y Consumo Responsable, al promover el uso eficiente de los recursos mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales, reduciendo el desperdicio y fomentando la economía circular. Asimismo, se vincula con la ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, al contribuir a la disminución de residuos contaminantes en entornos urbanos, mejorar la gestión de desechos y favorecer espacios más limpios y saludables.

Entre sus beneficios, destaca ser un producto seguro, higiénico y funcional, que no altera el sabor, olor ni composición de las bebidas, y que aporta valor agregado al ser ingerible, biodegradable y compatible con el organismo humano. Como diferenciador, EcoDrink integra innovación tecnológica, sustentabilidad y valor comestible en un solo producto. Además, utiliza materia prima local, reduciendo costos logísticos, fortaleciendo la economía regional y asegurando su viabilidad y competitividad en el mercado actual.

CONCLUSIONES

El desarrollo de EcoDrink demostró que es posible transformar residuos de piña en un producto funcional, biodegradable y seguro para el consumo humano, contribuyendo a la reducción de residuos plásticos de un solo uso y ayudando al medio ambiente. La propuesta integra innovación, sustentabilidad y aprovechamiento de subproductos agroindustriales, generando una alternativa viable para el mercado actual. Asimismo, favorece la economía circular al dar valor agregado a materiales que normalmente serían desechados. Los resultados obtenidos evidencian el potencial de EcoDrink para contribuir al cuidado del medio ambiente y promover hábitos de consumo responsables. Finalmente, el proyecto representa una oportunidad de crecimiento para futuras investigaciones orientadas a mejorar la resistencia, durabilidad y comercialización del producto a mayor escala.

REFERENCIAS

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). Food loss and waste.
<https://www.fao.org>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). ODS 12: Producción y consumo responsables.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). Gestión integral de residuos.
<https://www.gob.mx/semarnat>

Secretaría de Salud. (2009). NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. <https://www.dof.gob.mx>

Secretaría de Salud. (1994). NOM-120-SSA1-1994, Prácticas de higiene y sanidad en la preparación de alimentos y bebidas. <https://www.dof.gob.mx>

United Nations Environment Programme. (s.f.). Plastic pollution. <https://www.unep.org>

ANÁLISIS DEL MICROBIOMA DEL RÍO ACTOPAN Y SU RELACIÓN CON LOS IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS DEL USO DEL SUELO

Adriana Elena Rivera Meza¹

José Antonio Fernández Viveros²

Félix David Murillo Cuevas³

Jacel Adame García⁴

RESUMEN

El análisis del microbioma del río Actopan, ubicado en la región central del estado de Veracruz, constituye una estrategia innovadora para evaluar la relación entre la calidad del agua, los impactos antropogénicos asociados al uso del suelo y la diversidad microbiana presente en los ecosistemas acuáticos. Este enfoque permite generar información integral sobre las comunidades microbianas y su potencial utilidad como bioindicadores de alteraciones ambientales y riesgos sanitarios. Como parte de esta investigación, se estableció un diseño de muestreo estacional durante las épocas de sequía y lluvias en tres sitios representativos del río con diferentes niveles de presión antropogénica. En cada punto se determinaron parámetros fisicoquímicos in situ, incluyendo pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad y resistividad, indicadores fundamentales para evaluar la calidad ambiental del agua. Los resultados preliminares evidenciaron diferencias entre los sitios de muestreo, observándose incrementos en conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad en las zonas con mayor influencia de actividades agrícolas, ganaderas y urbanas. Además, se presenta la metodología empleada para la caracterización molecular de la diversidad microbiana mediante extracción de ADN y secuenciación del gen 16S rRNA, análisis que actualmente se encuentra en desarrollo. La integración futura de los resultados metagenómicos con la información fisicoquímica y espacial del uso del suelo permitirá comprender con mayor precisión la dinámica del microbioma acuático y su relación con los impactos antropogénicos en la cuenca del río Actopan, aportando información relevante para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la protección ambiental.

Palabras clave: microbioma acuático, calidad del agua, metagenómica, uso del suelo, río Actopan.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. adriana.rm@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jose.fv@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. felix.mc@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jacel.ag@ugalvan.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

El agua dulce constituye un recurso natural esencial para el funcionamiento de los ecosistemas y el desarrollo de las actividades humanas. La calidad y disponibilidad disminuyen debido al crecimiento urbano, la expansión agrícola, la deforestación y las descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado. A escala global, aproximadamente el 80 % de las aguas residuales municipales e industriales ingresa al ambiente sin tratamiento previo, situación que incrementa los riesgos para la salud pública y afecta la integridad ecológica de los sistemas acuáticos, especialmente en países en desarrollo (Lin *et al.*, 2022).

Los ríos de agua dulce reciben contaminantes de origen físico, químico y biológico procedentes de diversas actividades humanas. En estos ecosistemas, las comunidades microbianas participan en la degradación de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la regulación de procesos ecológicos fundamentales. Sin embargo, los cambios en el uso del suelo y el aumento de la presión antropogénica modifican la composición y estructura del microbioma acuático, lo que favorece la presencia de bacterias patógenas y oportunistas con implicaciones para la salud humana y animal (Pandey *et al.*, 2014; Chopyk *et al.*, 2020). En los últimos años, el estudio del microbioma acuático ha surgido como una herramienta complementaria para evaluar la respuesta de los ecosistemas fluviales ante las perturbaciones ambientales y los cambios en el uso del suelo.

El estudio del microbioma fluvial mediante herramientas moleculares de alta resolución proporciona información detallada sobre la diversidad microbiana presente en los ecosistemas acuáticos. En particular, la metagenómica permite identificar microorganismos y detectar patógenos emergentes que los métodos convencionales basados en organismos indicadores, como los coliformes fecales, no logran registrar de manera integral (Figura 1) (Ko *et al.*, 2022).



Figura 1. Esquema sobre la información que proporciona un estudio de microbioma fluvial. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

El río Actopan, ubicado en la región central del estado de Veracruz, posee una elevada importancia ecológica, social y productiva. Su cauce atraviesa áreas agrícolas, asentamientos urbanos y zonas con distintos niveles de transformación de la cobertura vegetal. Esta heterogeneidad ambiental ofrece condiciones adecuadas para analizar la influencia de los cambios en el uso del suelo sobre la diversidad microbiana y la presencia de bacterias potencialmente patógenas.

La contaminación microbiológica de los ecosistemas acuáticos guarda una estrecha relación con el crecimiento poblacional, la expansión urbana no planificada y el desarrollo de actividades agrícolas. Estos procesos incrementan el aporte de nutrientes, materia orgánica y microorganismos potencialmente patógenos hacia los cuerpos de agua (Schwarzenbach *et al.*, 2010; Tornevi *et al.*, 2014) (Figura 2).

El consumo de agua contaminada continúa entre las principales causas de enfermedades gastrointestinales y mortalidad infantil (Lin *et al.*, 2022). Los cambios en el uso del suelo modifican parámetros fisicoquímicos fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas fluviales, entre ellos el pH, el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica. Estas alteraciones afectan la estructura y composición de las comunidades microbianas y favorecen la presencia de bacterias de importancia clínica, incluidas enterobacterias y miembros del grupo ESKAPE, reconocidos por su resistencia a antimicrobianos (Giuliatti *et al.*, 2017; Vinueza *et al.*, 2021; Denissen *et al.*, 2022) (Figura 2).



Figura 2. Esquema sobre los cambios en el uso de suelo y la modificación en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en los ríos. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

Los ríos constituyen sistemas ecológicos complejos que regulan el transporte de nutrientes, la dinámica hidrológica y la conservación de la biodiversidad. La calidad del agua refleja tanto las características naturales de la cuenca como la intensidad de las actividades humanas desarrolladas en su entorno (Pandey *et al.*, 2014). Por esta razón, la caracterización conjunta de variables ambientales y microbiológicas resulta esencial para comprender los procesos que determinan el estado ecológico de los ecosistemas acuáticos.

Los estudios metagenómicos realizados en ríos tropicales reportan una mayor abundancia de bacterias patógenas y genes asociados con virulencia en zonas sujetas a intensa actividad humana. Estas investigaciones reportan asociaciones entre la disminución del oxígeno disuelto, la densidad poblacional, la deforestación y el incremento de microorganismos oportunistas para humanos (Acharya *et al.*, 2022; Mizusawa *et al.*, 2021). Las áreas localizadas aguas abajo de centros urbanos y agrícolas presentan una mayor diversidad de microorganismos relacionados con procesos de contaminación ambiental (Bartlett *et al.*, 2022).

El microbioma acuático integra comunidades de bacterias, arqueas, hongos, protistas y virus que participan en procesos fundamentales como la degradación de materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la regulación de la calidad del agua (Chopyk *et al.*, 2020). Las perturbaciones ambientales alteran este equilibrio ecológico y promueven cambios en la abundancia relativa de diversos grupos microbianos. Diversos estudios han documentado una mayor representación de los filos Proteobacteria y Actinobacteria en ríos sometidos a influencia urbana, grupos que incluyen numerosos microorganismos oportunistas y patógenos (Mizusawa *et al.*, 2021).

La evaluación microbiológica tradicional utiliza organismos indicadores, como los coliformes fecales. Sin embargo, este enfoque no permite detectar la totalidad de los microorganismos presentes en el ecosistema ni identificar patógenos emergentes de relevancia sanitaria (Ko *et al.*, 2022). En contraste, la metagenómica permite analizar el ADN total contenido en una muestra ambiental, identificar microorganismos cultivables y no cultivables, así como detectar genes relacionados con virulencia y resistencia antimicrobiana (Acharya *et al.*, 2022).

En México, la información sobre la diversidad microbiana de los ecosistemas fluviales permanece limitada, particularmente en regiones con elevada actividad agrícola y urbana. En el caso del río Actopan, los estudios disponibles se han enfocado principalmente en la evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos convencionales, por lo que aún existe escasa información acerca de la composición del microbioma acuático y de su posible relación con los cambios en el uso del suelo y las actividades antropogénicas presentes en la cuenca.

En este contexto, el análisis del microbioma mediante herramientas metagenómicas representa una estrategia innovadora para complementar los métodos tradicionales de monitoreo de la calidad del agua. La caracterización de las comunidades microbianas permite identificar cambios en la estructura ecológica de los ecosistemas acuáticos, detectar microorganismos potencialmente patógenos y generar indicadores biológicos sensibles a las alteraciones ambientales.

El río Actopan atraviesa áreas agrícolas, asentamientos humanos y zonas con diferentes niveles de conservación de la cobertura vegetal, condiciones que ofrecen una oportunidad para estudiar la influencia de las actividades humanas sobre la calidad ambiental del sistema fluvial. Por ello, se plantea una investigación integral que incorpora análisis fisicoquímicos, microbiológicos y espaciales con el propósito de comprender la relación entre el uso del suelo y la dinámica microbiana del río.

El presente trabajo describe la estrategia metodológica propuesta para la caracterización del microbioma del río Actopan y presenta resultados preliminares de los análisis fisicoquímicos realizados en distintos puntos de muestreo. Estos resultados constituyen una línea base para futuros estudios orientados a relacionar la calidad del agua, las características del uso del suelo y la composición de las comunidades microbianas presentes en este ecosistema acuático. Bajo este enfoque, la caracterización fisicoquímica constituye una primera aproximación para identificar gradientes de alteración ambiental en el río Actopan, los cuales serán posteriormente contrastados con la composición y diversidad del microbioma acuático obtenida mediante análisis metagenómicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El río Actopan se localiza en la región central del estado de Veracruz, México, y constituye un importante sistema fluvial que atraviesa zonas con diferentes usos del suelo, incluyendo áreas agrícolas, asentamientos humanos, actividades ganaderas y ecosistemas de vegetación natural. La heterogeneidad ambiental presente en la cuenca ofrece condiciones adecuadas para evaluar la influencia de los impactos antropogénicos sobre la calidad del agua y la estructura de las comunidades microbianas acuáticas.

Muestreo

Con el propósito de generar una línea base para el estudio del microbioma del río Actopan, se estableció un diseño de muestreo estacional durante las temporadas de sequía y lluvias. Se seleccionaron tres sitios representativos de acuerdo con el grado de influencia antropogénica presente en la cuenca: M1, ubicado aguas abajo de la zona urbana de Úrsulo Galván; M2, localizado en la

localidad Barra de Chachalacas; y M3, situado en la localidad de Chachalacas, próximo a la desembocadura del río en el Golfo de México (Figura 3).

En cada sitio se realizaron muestreos en tres puntos del cauce (orilla izquierda, zona central y orilla derecha), obteniéndose tres réplicas biológicas por sitio. Las muestras de agua fueron recolectadas a una profundidad aproximada de 20 cm utilizando recipientes estériles de polietileno con capacidad de 5 L. Posteriormente, las muestras se transportaron en contenedores térmicos con hielo y procesadas en laboratorio dentro de las primeras 24 horas posteriores a su colecta (Figura 4).

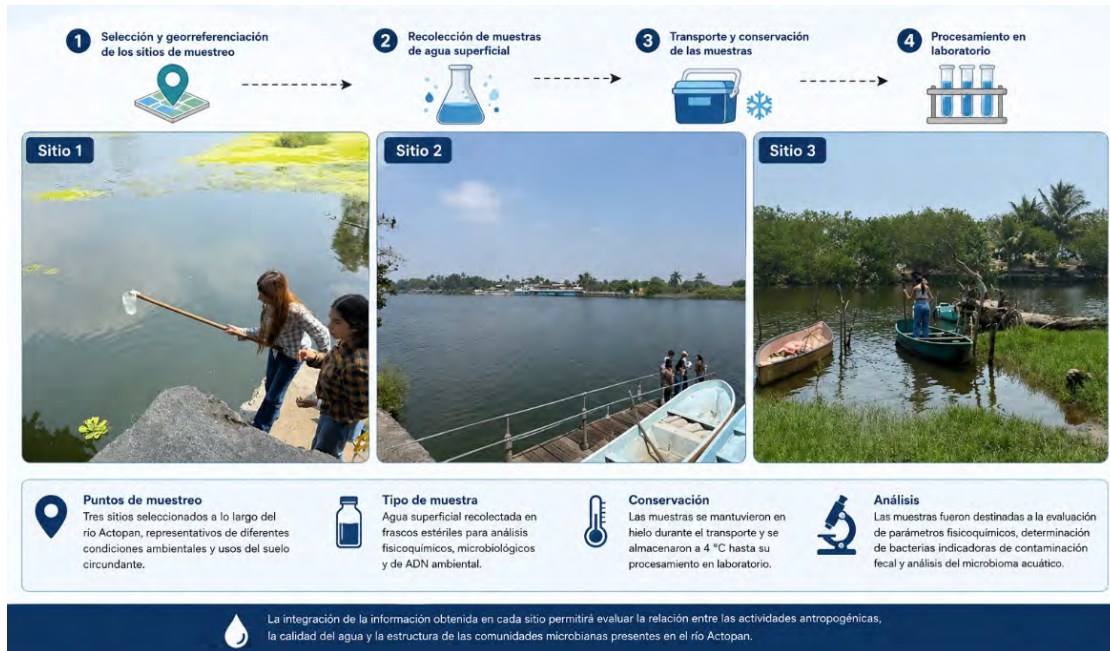


Figura 3. Muestreo del Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

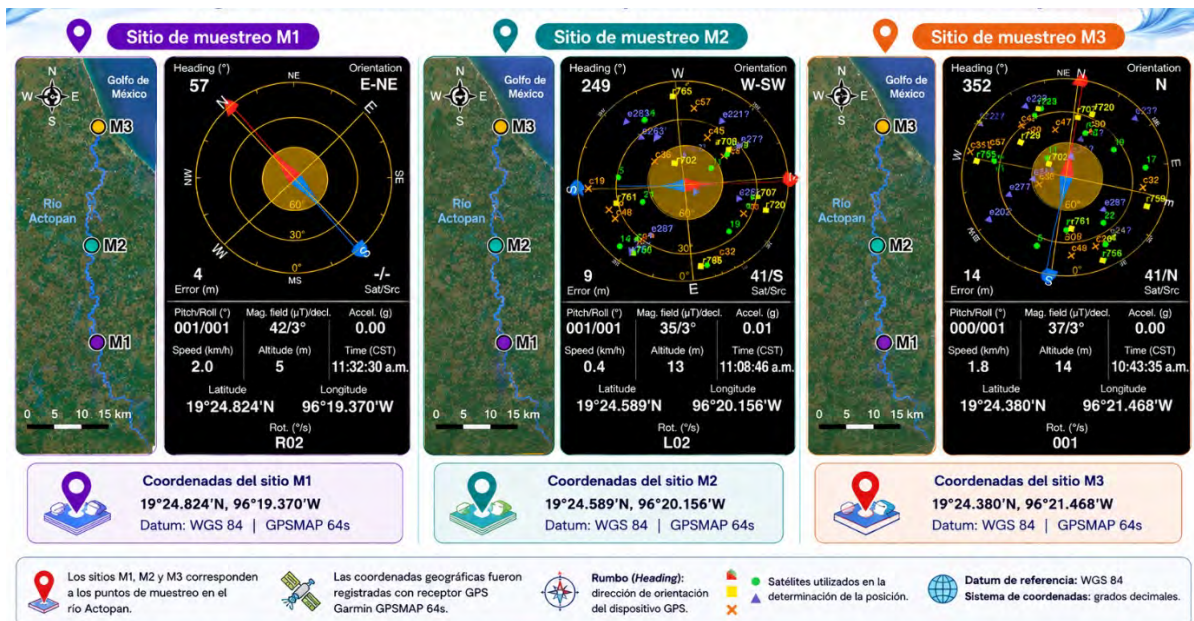


Figura 4. Georreferenciación de los sitios de muestreo del Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

Caracterización fisicoquímica del agua

Como parte de la evaluación integral del ecosistema fluvial, se determinaron in situ diversos parámetros fisicoquímicos relacionados con la calidad del agua. Entre las variables evaluadas se incluyeron pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS), salinidad y resistividad. Estos parámetros se seleccionaron seleccionados debido a su importancia como indicadores de alteraciones ambientales asociadas con actividades agrícolas, ganaderas y urbanas. Los datos obtenidos permitieron identificar gradientes espaciales de calidad del agua y establecer una línea base ambiental para posteriores análisis microbiológicos y metagenómicos.

Análisis microbiológico y preparación de muestras para estudios microbioma

Como parte de la caracterización microbiológica del río Actopan, se realizó la determinación de bacterias indicadoras de contaminación fecal mediante la técnica del Número Más Probable (NMP), siguiendo los procedimientos establecidos en la NOM-112-SSA1-1994, Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. Inicialmente se efectuó la prueba presuntiva mediante la inoculación de series de tubos con caldo selectivo para la detección de coliformes totales. Posteriormente, las muestras que presentaron resultados positivos fueron sometidas a la prueba confirmativa para verificar la presencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal. Los resultados obtenidos permitieron estimar la concentración de bacterias presentes en las muestras de agua y proporcionar información preliminar sobre la calidad microbiológica del río.

De manera complementaria, el análisis del microbioma acuático se planteó como una estrategia para evaluar la diversidad microbiana y su relación con los impactos antropogénicos asociados al uso del suelo. Para ello, se realizó la extracción de ADN total de las muestras utilizando el kit comercial ZymoBIOMICS® DNA Miniprep (Zymo Research, Irvine, California, USA), siguiendo las especificaciones del fabricante.

La calidad y concentración del ADN extraído fueron evaluadas mediante espectrofotometría de microvolumen NanoDrop® (Thermo Fisher Scientific, USA), utilizando la relación de absorbancia A260/A280 como indicador de pureza. Posteriormente, las muestras fueron enviadas para la secuenciación del gen 16S rRNA, con el propósito de caracterizar la composición taxonómica de las comunidades bacterianas presentes en el ecosistema acuático.

Los resultados derivados de la secuenciación y del análisis bioinformático permitirán complementar la información microbiológica convencional obtenida mediante la técnica del Número Más Probable, facilitando una evaluación más integral de la calidad del agua y de la influencia de las actividades antropogénicas sobre la estructura del microbioma del río Actopan (Figura 5).



Figura 5. Esquema sobre la caracterización microbiológica y análisis del microbioma en el Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

Integración de información

La estrategia de análisis contempla la integración de información fisicoquímica, microbiológica y espacial para evaluar la relación entre el uso del suelo y la estructura del microbioma acuático. Los datos de secuenciación permitirán determinar la composición taxonómica de las comunidades microbianas, estimar índices de diversidad y abundancia relativa, así como identificar microorganismos potencialmente asociados con condiciones de contaminación ambiental. Adicionalmente, las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo serán utilizadas para caracterizar el uso del suelo en las áreas circundantes mediante herramientas de análisis espacial. La integración de estas variables permitirá evaluar la influencia de las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua y sobre la dinámica de las comunidades microbianas presentes en el río Actopan (Figura 6).

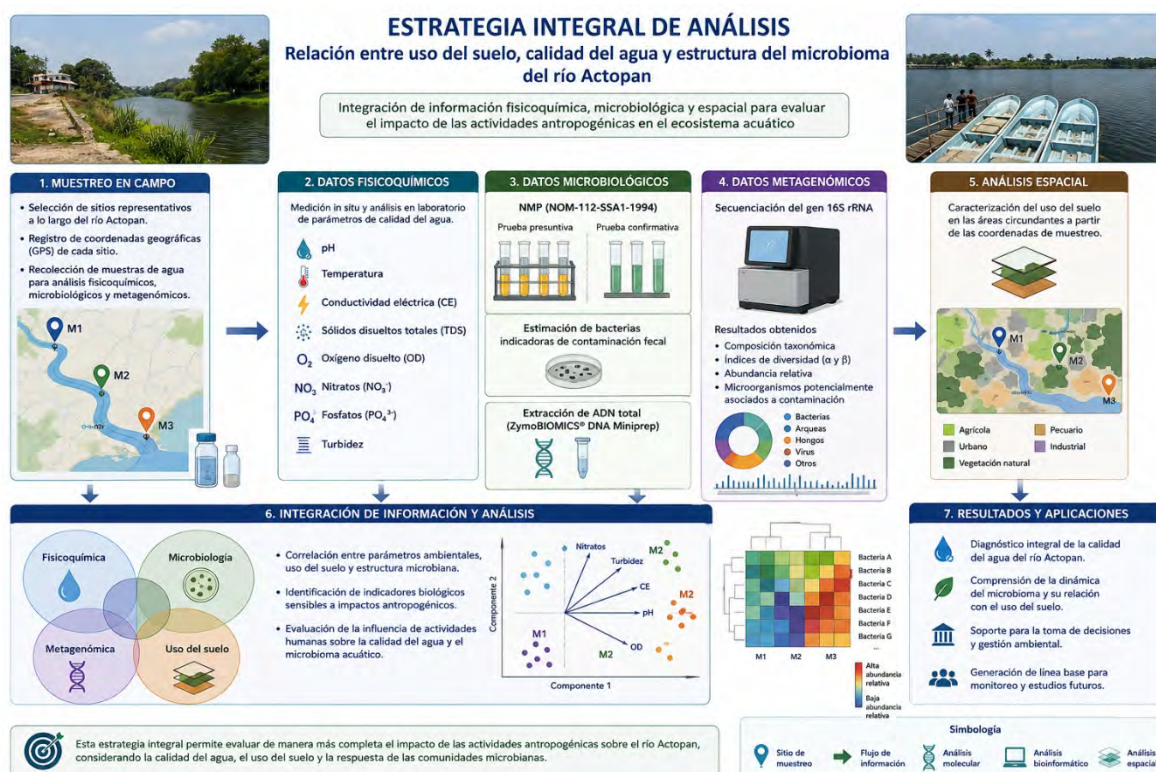


Figura 6. Esquema sobre la caracterización microbiológica y análisis del microbioma en el Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos registrados en los tres sitios de muestreo del río Actopan evidenciaron diferencias espaciales que reflejan distintos grados de influencia antropogénica y constituyen una primera aproximación para comprender las condiciones ambientales que podrían influir en la estructura del microbioma acuático. La caracterización fisicoquímica representa una etapa fundamental dentro de la estrategia integral de análisis, ya que las propiedades del agua influyen directamente sobre la composición, abundancia y diversidad de las comunidades microbianas presentes en los ecosistemas fluviales.

En términos generales, se observó un incremento progresivo en la concentración de sales y sólidos disueltos desde el sitio M1 hasta el sitio M3 (Figura 7). Este comportamiento sugiere la existencia de un gradiente ambiental asociado con los diferentes usos del suelo presentes en la cuenca, incluyendo actividades agrícolas, ganaderas y asentamientos humanos. Tendencias similares han sido reportadas en sistemas acuáticos sometidos a presiones antropogénicas, donde la incorporación de nutrientes, materia orgánica y compuestos disueltos modifica las características fisicoquímicas del agua y, consecuentemente, las condiciones ecológicas para las comunidades microbianas (Giuliatti et al., 2017; Vinueza et al., 2021).

El pH presentó valores alcalinos en todos los sitios evaluados, con un incremento gradual desde M1 (8.55 ± 0.08) hasta M3 (8.92 ± 0.03) (Figura 7). Estos resultados indican condiciones relativamente homogéneas dentro del rango alcalino, posiblemente asociadas con la composición geológica de la cuenca y con aportes derivados de actividades productivas y domésticas. La alcalinidad constituye un factor importante para la dinámica microbiana, ya que puede influir en la disponibilidad de nutrientes y en la selección de grupos bacterianos adaptados a determinadas condiciones ambientales.

La temperatura mostró escasa variación entre sitios, registrándose valores entre 23.9 y 25.1 °C. Aunque las diferencias fueron moderadas, el valor más elevado se observó en M3, posiblemente debido a una mayor exposición a la radiación solar y a cambios en la cobertura vegetal ribereña. La temperatura es uno de los factores ambientales que regulan la actividad metabólica de los microorganismos y puede influir en los procesos biogeoquímicos desarrollados en el ecosistema acuático.

La conductividad eléctrica presentó un incremento considerable a lo largo del gradiente de muestreo, pasando de 0.525 mS en M1 a 3.089 mS en M3 (Figura 7). Este comportamiento evidenció una mayor concentración de compuestos iónicos disueltos en los sitios con mayor influencia antropogénica. La presencia de fertilizantes, escorrentía agrícola, aportes orgánicos y descargas domésticas puede contribuir significativamente al aumento de este parámetro. Diversos estudios han señalado que los cambios en la conductividad eléctrica constituyen indicadores sensibles de alteraciones ambientales derivadas del uso del suelo (Giuliatto et al., 2017; Schwarzenbach et al., 2010).

Los sólidos disueltos totales (TDS) mostraron una tendencia similar, incrementándose de 0.263 g L⁻¹ en M1 a 1.544 g L⁻¹ en M3 (Figura 7). Este patrón sugiere una acumulación progresiva de materia disuelta a lo largo del río y podría estar relacionado con procesos de escorrentía superficial, erosión y aportes provenientes de actividades agrícolas y urbanas. La presencia de mayores concentraciones de sólidos disueltos puede modificar la disponibilidad de nutrientes y generar cambios en la composición de las comunidades microbianas acuáticas.

La salinidad presentó el aumento más marcado entre los parámetros evaluados, registrando valores promedio de 1.17 ‰ en M1, 5.14 ‰ en M2 y 6.74 ‰ en M3 (Figura 7). Este comportamiento podría atribuirse tanto a la acumulación de sales derivadas de actividades humanas como a la proximidad del sitio M3 con la zona de influencia estuarina y marina. La salinidad es reconocida como uno de los factores ambientales con mayor capacidad para modificar la estructura de las comunidades microbianas, favoreciendo grupos adaptados a condiciones osmóticamente más restrictivas (Chopyk et al., 2020).

En contraste, la resistividad mostró una disminución progresiva desde 1880 Ω en M1 hasta 324 Ω en M3 (Figura 7). Esta tendencia fue consistente con el incremento observado en la conductividad eléctrica y refleja una mayor capacidad del agua para conducir corriente debido al aumento de sales y compuestos iónicos disueltos. La relación inversa entre ambos parámetros ha sido ampliamente documentada en cuerpos de agua sujetos a procesos de enriquecimiento químico y contaminación difusa (Giuliatti et al., 2017).



Figura 7. Resultados de los parámetros fisicoquímicos del Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

Con respecto a la calidad y cuantificación del ADN extraído (Figura 8), la extracción de ADN total a partir de las muestras de agua del río Actopan permitió obtener material genético apto para análisis moleculares posteriores. La evaluación mediante espectrofotometría de microvolumen NanoDrop® mostró concentraciones promedio cercanas a 11.6 ng μL^{-1} y relaciones A260/A280 de 1.84, valores que indican una calidad adecuada del ADN para su procesamiento y secuenciación. No obstante, los valores de A260/A230 sugieren la posible presencia de compuestos residuales provenientes de la matriz ambiental, condición frecuente en muestras acuáticas con elevada carga orgánica.



Figura X. Extracción, cuantificación y calidad del ADN total obtenido de muestras de agua del río Actopan. La concentración se expresa en ng/μL y la pureza mediante las relaciones de absorbancia A260/A280 y A260/A230.

Figura 8. Resultados del ADN extraído de las muestras de agua del Río Actopan. Esquema creado con Inteligencia artificial (ChatGPT Go).

La obtención exitosa de ADN confirmó la viabilidad de las muestras para la secuenciación del gen 16S rRNA y el posterior análisis metagenómico del microbioma acuático. Estos resultados constituyen una etapa fundamental para la caracterización de la diversidad microbiana y para el estudio de la relación entre los cambios en el uso del suelo, la calidad del agua y la estructura de las comunidades microbianas presentes en el río Actopan.

CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en el río Actopan evidenciaron diferencias espaciales entre los sitios de muestreo, particularmente en conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad y resistividad, lo que sugiere la presencia de gradientes ambientales asociados con distintos niveles de influencia antropogénica en la cuenca.

Los sitios M2 y M3 presentaron mayores concentraciones de sales y compuestos disueltos en comparación con M1, indicando una posible influencia de actividades agrícolas, ganaderas y urbanas sobre la calidad del agua.

Estas variaciones constituyen indicadores relevantes para la evaluación ambiental del sistema fluvial y permiten identificar zonas potencialmente más susceptibles a procesos de alteración ecológica.

La aplicación de la técnica del Número Más Probable (NMP), de acuerdo con la NOM-112-SSA1-1994, permitió obtener información preliminar sobre la calidad microbiológica del agua y establecer una base de referencia para futuras evaluaciones de contaminación microbiológica en el río Actopan.

La obtención y caracterización de ADN microbiano demostraron la factibilidad de implementar herramientas moleculares para el estudio del microbioma acuático del río. En este sentido, la secuenciación del gen 16S rRNA representa una estrategia prometedora para identificar la diversidad microbiana, determinar la composición taxonómica de las comunidades bacterianas y detectar microorganismos asociados con cambios en las condiciones ambientales.

La integración de información fisicoquímica, microbiológica convencional, geoespacial y metagenómica permitirá fortalecer la comprensión de la relación entre el uso del suelo y la dinámica de las comunidades microbianas presentes en el río Actopan. Este enfoque integral contribuirá al desarrollo de herramientas de monitoreo ambiental más precisas y al diseño de estrategias orientadas a la conservación de los recursos hídricos y la protección de la salud pública.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una línea base para investigaciones futuras dirigidas a evaluar el microbioma como bioindicador de la calidad ambiental en ecosistemas fluviales sujetos a presión antropogénica.

REFERENCIAS

- Acharya, K., Khanal, S. N., Pantha, K., Amatya, N., Davenport, R. J., & Werner, D. (2022). Pathogen indicators and microbial community composition in urban rivers impacted by wastewater discharge. *Science of the Total Environment*, 806, 150646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150646>
- Bartlett, J. G., Gilbert, D. N., & Spellberg, B. (2022). Seven ways to preserve the miracle of antibiotics. *Clinical Infectious Diseases*, 56(10), 1445–1450. <https://doi.org/10.1093/cid/cit070>
- Chopyk, J., Nasko, D. J., Allard, S., Bui, A., Pop, M., & Sapkota, A. R. (2020). Agricultural freshwater pond supports diverse and dynamic bacterial and viral populations. *Frontiers in Microbiology*, 11, 153. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00153>
- Denissen, J., Reygaert, W. C., & Verhoeven, P. O. (2022). The ESKAPE pathogens: An overview of resistance mechanisms and treatment options. *Journal of Infection and Public Health*, 15(2), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.12.008>
- Giuliatti, N. M., Pereira, M. A., & De Araujo, J. C. (2017). Effects of land use on water quality and benthic macroinvertebrate assemblages in tropical streams. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4), 170. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5851-3>
- Ko, K. K., Chiu, C. Y., Lee, C. W., & Chen, H. J. (2022). Limitations of fecal indicator bacteria for detecting waterborne pathogens. *Water Research*, 215, 118254. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118254>

- Li, D., Liu, C. M., Luo, R., Sadakane, K., & Lam, T. W. (2022). MEGAHIT: An ultra-fast single-node solution for large and complex metagenomics assembly via succinct de Bruijn graph. *Bioinformatics*, 31(10), 1674–1676. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv033>
- Lin, J., Ganesh, A., & Singh, A. (2022). *Global wastewater treatment and reuse: Status, challenges, and opportunities*. **Water Research**, **216**, 118308. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118308>
- Mizusawa, N., Niwa, T., Nishimura, O., & Yoshida, K. (2021). *Spatial variation of bacterial communities along an urban river revealed by high-throughput sequencing*. **Environmental Science and Pollution Research**, **28**(3), 3275–3286. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10876-5>
- Pandey, P. K., Kass, P. H., Soupir, M. L., Biswas, S., & Singh, V. P. (2014). Contamination of water resources by pathogenic bacteria. *AMB Express*, 4, 51. <https://doi.org/10.1186/s13568-014-0051-x>
- Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072–1077. <https://doi.org/10.1126/science.1127291>
- Tornevi, A., Bergstedt, O., & Forsberg, B. (2014). Precipitation effects on microbial pollution in a river: Lag structures and seasonal effect modification. *PLoS ONE*, 9(5), e98546. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098546>
- Vinueza, R., Mena, C. F., & Boillat, S. (2021). Water quality degradation in tropical river basins under agricultural and urban pressure. *Environmental Challenges*, 5, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100297>

EFFECTO FLORAL DEL INJERTO DE CORONA DE TRES CACTÁCEAS EN 2 PORTAINJERTOS EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ

Daniel Utrera López¹
Gustavo Pérez Gonzalez²
Juana Fabiola Jiménez Flores³
Montserrat Acosta Cadenas⁴
Ramiro Sánchez Uranga⁵

RESUMEN

Las cactáceas son un grupo de plantas cuya distribución mundial es exclusiva del continente americano. De las 1,500 especies existentes, 850 se encuentran en México, lo que convierte al país en el más rico en diversidad de cactus. Sin embargo, un gran número de estas especies se encuentra en alguna categoría de riesgo dentro de la NOM-059, lo que evidencia que están seriamente amenazadas. De ahí radica la importancia de implementar estrategias que contribuyan a su conservación; una de ellas es el injerto, técnica que permite obtener floración y semillas en un menor tiempo. En este estudio se evaluaron tres especies que presentan un periodo de floración de 2 a 5 años (*Astrophytum asterias*, *Lobivia arachnacantha* y *Gymnocalycium mihanovichii*) sobre dos portainjertos (*Myrtillocactus geometrizans* e *Hylocereus undatus*), utilizando el método de injerto de corona o caras planas para determinar cuál de los dos portainjertos proporcionaría una mejor compatibilidad. El diseño experimental fue completamente al azar (3 X 2 X 10). Se logró 100% supervivencia en ambos portainjertos; sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron en *Myrtillocactus geometrizans*, ya que propició la floración en *Astrophytum asterias* y *Lobivia arachnacantha*, mientras que *Gymnocalycium mihanovichii* no presentó floración en ninguno de los portainjertos.

Palabras Clave: Floración, *Gymnocalycium*, Injerto, *Astrophytum*, Cactáceas, Portainjerto, *Lobivia*,

INTRODUCCIÓN

Las cactáceas se distribuyen desde hace millones de años, cuando se dividió el supercontinente Pangea, dando origen a los continentes americano y africano, a Madagascar y a Sri Lanka; en estos tres últimos solo se encuentra la especie *Rhipsalis baccifera*. La mayoría de estas plantas se adaptaron y evolucionaron sobre todo en el continente americano, desde Canadá hasta la Patagonia.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. daniel.ul@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. gustavoooperezgon@gmail.com

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Juana.jf@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. monserrat.ac@ugalvan.tecnm.mx

⁵ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. ramiro.su@ugalvan.tecnm.mx

Habitualmente, los cactus manifiestan atributos ecofisiológicos (desarrollo lento, floración efímera, germinación y supervivencia *in situ* limitada, entre otros) que los hacen sensibles ante las perturbaciones sobre sus hábitats y sus comunidades naturales (Becerra, 2000; Jiménez-Sierra, 2011). Entre sus usos destaca el ornamental debido a la belleza de sus flores, el color y forma de sus espinas y tallos, el tamaño, la presencia de fieltro, pelos y colores diversos provocados por mutaciones, entre otras características; por ello, el saqueo ilegal de ejemplares de su hábitat ha puesto en riesgo de extinción a muchas especies (Duarte et al., 2014). Ante esto, el gobierno mexicano creó la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 para la protección de especies nativas de México, incluidas las cactáceas. Sin embargo, el interés de los coleccionistas por adquirir estas plantas no ha cesado; por lo anterior, es necesario establecer estrategias para su conservación y aprovechamiento sustentable, que incluyan estudios de las poblaciones silvestres para conocer su estatus (Estrada-Arellano et al., 2018).

Las cactáceas en México son un grupo representativo de las zonas áridas que actualmente presenta problemas de conservación debido a la sobreexplotación y al saqueo de los que han sido objeto en todo el país. Actualmente, muchas de las actividades antropogénicas están causando la disminución de sus poblaciones con acciones tales como la destrucción de su hábitat por asentamientos humanos, el saqueo ilegal o la introducción de especies exóticas (Meza-Rangel, 2014). Con este estudio se pretende propagar y conservar tres especies de cactáceas mediante el injerto de corona en dos portainjertos garmbullo (*Myrtillocactus geometrizans*) e pitahaya (*Hylocereus undatus*), con el fin de evitar la extracción ilegal de su hábitat y lograr que los invernaderos hagan uso de esta técnica de propagación para abastecer la demanda de los coleccionistas. Con esto se busca mitigar la destrucción de los ecosistemas, observando el comportamiento de los injertos en dichas especies durante la floración para la reproducción sexual por semillas.

TAXONOMIA Y MORFOLOGIA DE LAS CACTACEAS EN ESTUDIO. ESPECIE *Hylocereus undatus*, Existen hasta 27 especies del género *Hylocereus*, de las cuales solo 19 tienen descripciones taxonómicas; de estas, tres son consideradas como sinonimias, de tal forma que, de acuerdo con publicaciones válidas para la taxonomía de cactáceas, a la fecha hay 16 especies formalmente descritas. De este grupo, 12 se encuentran en México (Rodríguez, 2000). La planta de pitahaya es perenne, epífita, trepadora, con tallos verdes, articulados, carnosos y de forma triangular. Sus tallos se componen de tres alas onduladas con márgenes festoneados córneos y los segmentos del tallo pueden crecer hasta 6 m de largo. Cada canal de las alas festoneadas tiene de una a tres espinas cortas de 1.5 cm de espesor, aunque algunas variedades son más espinosas que otras. Las raíces aéreas crecen desde la parte inferior de los tallos, proporcionando el anclaje necesario para que las plantas trepen por paredes, rocas o árboles. La floración es nocturna; las flores tienen segmentos

exteriores verdes e interiores blancos, miden aproximadamente 30 cm de largo y 23 cm de ancho, poseen forma de campana, son muy fragantes y su estigma es lobulado y de color verde. Estas abren durante la noche y se marchitan al amanecer (Zee et al., 2004; Le Bellec y Vaillant, 2011). La pitahaya (*Hylocereus* sp.) se encuentra ampliamente distribuida en la selva tropical y subtropical de México y representa un recurso fitogenético con potencial frutícola, ornamental y medicinal (Bárcenas-Abogado et al., 2002).

ESPECIE *Astrophytum asterias*, *Astrophytum asterias* (cactus estrella o falso peyote) es un pequeño cactus de tallo globoso hemisférico de hasta 5.5 cm de altura y de 6 a 10 cm de diámetro, de color verde grisáceo, con tricomas, sin espinas y con 6 a 9 aréolas. Las flores son amarillas y tienen el centro rojo. Sus frutos son largos, rojos y carnosos, y producen de 56 a 95 semillas marrones o negras (Rocha, 1995). Presenta una epidermis verde grisácea provista de numerosos y diminutos puntos blancos, así como un ápice hundido con algo de lana. Tiene entre 7 u 8 costillas muy anchas, redondeadas y poco o nada prominentes, de 3 a 3.5 cm de anchura, duras y rectas. Las aréolas se ubican en el dorso de las costillas, distantes entre sí de 4 a 7 mm; son prominentes, circulares, de 4 a 5 mm de diámetro y están cubiertas con fieltro blanco.

La especie fue listada en octubre de 1993 como una especie de prioridad dos por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS, 1993), en el Apéndice I de CITES (Lüthy, 2001) y en la lista mexicana de especies en peligro de extinción; esta especie alcanza la madurez reproductiva para florecer entre los 3 y 5 años a partir de la germinación de la semilla.

ESPECIE *Lobivia arachnacantha*, El género *Lobivia* comprende más de 100 especies y subespecies de plantas de la familia Cactaceae. Su nombre es un anagrama de Bolivia, el país con mayor abundancia de este género, aunque también están distribuidas en Argentina y Perú. Tienen formas globulares o cilíndricas achatadas (pequeñas) muy parecidas a las del género *Echinopsis* (actualmente, todo este género migró a *Echinopsis*). Tienen abundante floración, con flores grandes y de vivos colores. Este género necesita del frío y la sequedad del invierno para poder florecer en primavera y verano; durante la temporada de primavera-verano, se debe mantener en un ambiente húmedo y con exposición directa al sol. Se agrupa libremente y forma grandes grupos con el tiempo; su tallo va de aplanado a esférico, de color verde oscuro y con costillas de muescas débiles. Cada cabeza mide hasta 4 cm de ancho; sus espinas son todas radiales, dispuestas en forma de telaraña, blancas, amarillas o marrones, erizadas, curvas y cortas. Sus flores son muy llamativas, de unos 5 cm de ancho, con un tubo floral delgado de hasta 5 cm o más de largo, comúnmente de color amarillo dorado a naranja (a menudo más grandes que la planta misma), aunque también se reportan flores de color rojo o blanco. Las flores se abren durante el día desde la primavera hasta el verano, y su fruto

es verde rojizo (Buining y Ritter, 1974). Esta especie alcanza la madurez reproductiva para florecer entre los 2 y 4 años a partir de la germinación de la semilla.

ESPECIE *Gymnocalycium mihanovichii*, *Gymnocalycium* es un género de cactus de tallo globoso del este de los Andes y Sudamérica (Anderson, 2001). El género *Gymnocalycium* se caracteriza por presentar un bajo crecimiento y tallos generalmente solitarios con varias costillas que en ocasiones son tuberculadas; no tienen una zona fértil diferenciada y las flores nacen directamente del ápice del tallo, el cual suele estar deprimido. Las flores se abren durante el día, morfológicamente son infundibuliformes o acampanadas, y muestran una coloración blanca o rosada. Los pericarpelos y los tubos florales poseen unas pocas escamas anchas y obtusas con márgenes membranosos, sus aréolas son desnudas y los frutos son oblongos o globosos, secos o carnosos y dehiscentes (Anderson, 2001). *Gymnocalycium* comprende unas 50 especies, la mayor parte de ellas endémicas de regiones geográficas restringidas (Charles, 2009; Metzinger, 2012). En Argentina es el género de la familia con mayor número de especies (41), representando el 18% de la riqueza total de Cactaceae (Kiesling et al., 2008). Actualmente, el género se divide en subgéneros de acuerdo con la clasificación establecida por Schütz (1986), basada en las características de las semillas, la anatomía floral y la del fruto. Es abundante en ambientes serranos entre los 500 y 1200 m s. n. m. (Charles, 2009; Gurvich et al., 2014); esta especie alcanza la madurez reproductiva para florecer entre los 2 y 3 años a partir de la germinación de la semilla.

PROPAGACION DE CACTACEAS MEDIANTE INJERTO. Actualmente existen infinidad de injertos en cactus de manera comercial y empírica, ya que los realizan viveristas que se encuentran en zonas rurales, generando plantas mejoradas por su vistosidad en formas y colores que resultan atractivos para los compradores y coleccionistas. Los injertos en cactáceas se acostumbran hacer en especies de lento crecimiento o de difícil enraizamiento. Las plantas sobre las que se coloca el injerto se seleccionan por su rapidez de crecimiento y facilidad de cultivo. Las especies recomendadas para servir de patrón de injerto son: *Pereskia* sp., *Myrtillocactus geometrizans*, *Hylocereus* sp. y *Selenicereus* sp. Los tejidos se sueldan mejor en la época vegetativa; por lo tanto, se recomienda injertar en primavera y verano, así como en días no lluviosos que pudieran proporcionar un ambiente apto para la proliferación de hongos y bacterias (Hartmann y Kester, 2002).

El injerto de caras planas es el más utilizado porque es el más sencillo y rápido; suele dar buenos resultados y se realiza desde finales de primavera hasta mediados del verano. Consiste en cortar, con un cuchillo y a lo largo de un tajo, el extremo de una planta vigorosa para dejar una base de 2.5 a 5 cm de alto en la maceta; posteriormente, la planta a injertar se corta de un solo tajo para colocarla sobre el patrón. Si el anillo del haz vascular del patrón y del injerto tienen el mismo diámetro, los haces vasculares coincidirán al unir la planta (Toogood, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de estudio se realizó en un periodo comprendido de febrero a agosto de 2023, en un vivero de 30 metros cuadrados con estructura de concreto y cubierta de plástico para invernadero, protegido con malla mosquitera alrededor del mismo. Este se encuentra ubicado en Cardel, Veracruz, con las coordenadas 19°21'35" N, 96°21'32" W. La temperatura promedio máxima registrada en el interior ha sido de 38 °C, mientras que la mínima (cuando se ha presentado mal tiempo) ha sido de 24 °C.

Se empleó un diseño experimental al azar de 3 x 2 x 10 (3 injertos x 2 portainjertos x 10 repeticiones). La duración del experimento abarcó un periodo de 180 días (6 meses) en el que se analizaron las variables de crecimiento, específicamente el diámetro de la planta injertada en los dos portainjertos. Los injertos se realizaron de la siguiente manera, como se muestra en la figura 1: **A)** Selección del portainjerto a trabajar., **B)** Corte horizontal en la punta del portainjerto., **C)** Corte transversal de 45° a las 5 costillas del portainjerto para evitar la deshidratación del ápice. Este detalle es muy importante para que el tallo no se comprima ni despegue el injerto al secar la herida., **D)** Vista del ápice con los cortes de las costillas realizados (biselado)., **E)** Corte de la planta a injertar, en donde se observan los haces vasculares que tienen que coincidir para lograr un injerto exitoso., **F)** Amarre del injerto con película autoadherible., **G)** Injerto terminado., Se tomaron datos de crecimiento en milímetros (mm) cada 30 días.



Figura 1 Procedimiento para realizar un injerto. (Pérez Gustavo, 2023).

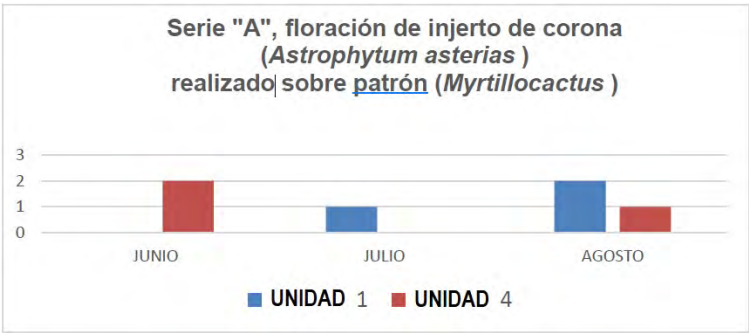
RESULTADOS.

Los datos fueron analizados para obtener cuadros y gráficas de prendimiento entre el injerto y el patrón, así como la comparación por serie para cada una de las combinaciones con las que se trabajó. Las unidades experimentales consistieron en dos portainjertos (20 unidades experimentales en total): *Myrtillocactus geometrizans* e *Hylocereus undatus*. El número de réplicas por tratamiento fue de 10 repeticiones para un portainjerto y 10 para el otro; las plantas utilizadas como injertos fueron *Astrophytum asterias*, *Lobivia arachnacantha* y *Gymnocalycium mihanovichii*.

Una vez realizados los injertos, a los 7 días se les retiró la película adhesiva y se hizo una revisión de los mismos; el 100% resultó un éxito, ya que no hubo desprendimiento del tejido. Mensualmente se registró la medición de cada planta con un vernier, así como sus floraciones. (Pérez Gonzalez, 2023).

Cuadro 1. serie "A", floración de injerto de corona (*Astrophytum asterias*) realizado sobre patrón (*Myrtillocactus geometrizans*).

FECHA MEDICION	UNIDAD 1	UNIDAD 4
06/02/2023	0	0
20/02/2023	0	0
07/05/2023	0	9
07/06/2023	0	0
07/07/2023	1	2
07/08/2023	2	1



Gráfica 1. Floración del injerto de la especie *Astrophytum asterias* realizado sobre patrón *Myrtillocactus geometrizans*.



Figura 2. Formación de botón floral y floración de la unidad 1 serie “A” *Astrophytum asterias* a los 4 meses de injertado sobre patrón *Myrtillocactus geometrizans* (Pérez Gustavo, 2023).

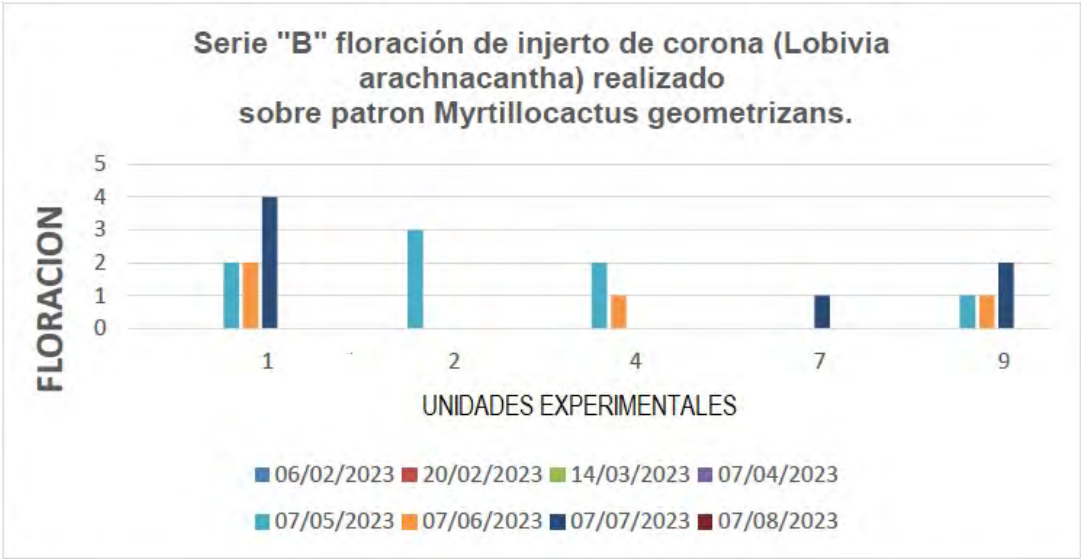


Figura 3. Formación de botón floral y floración de la unidad 4 serie “A” *Astrophytum asterias* a los 5 meses de injertado sobre patrón *Myrtillocactus geometrizans* (Pérez Gustavo, 2023).

Los injertos de la especie ***Lobivia arachnacantha*** realizados sobre *Myrtillocactus* se obtuvo floración en las unidades 1, 2, 4, 7 y 9 como se observa en el (cuadro 2) de acuerdo a Oudshoorn (1978) el adelanto de la brotación y floración es por efecto del portainjerto.

Cuadro 2. serie "B", floración de injerto de corona (***Lobivia arachnacantha***) realizado sobre patrón (***Myrtillocactus geometrizans***).

FECHA MEDICION	UNIDAD 1	UNIDAD 2	UNIDAD 4	UNIDAD 7	UNIDAD 9
06/02/2023	0	0	0	0	0
20/02/2023	0	0	0	0	0
14/03/2023	0	0	0	0	0
07/04/2023	0	0	0	0	0
07/05/2023	2	3	2	0	1
07/06/2023	2	0	1	0	1
07/07/2023	4	0	0	1	2
07/08/2023	0	0	0	0	0



Gráfica 2. Floración del injerto de la especie ***Lobivia aarachnacantha*** realizado sobre patrón ***Myrtillocactus geometrizans***.



Figura 4 Floración de la Unidad 1 y botón floral y floración de la Unidad 2 serie “B”, *Lobivia arachnacantha* injertada sobre el patrón *Myrtillocactus geometrizans*, del 7 de julio (Pérez Gustavo, 2023).



Figura 5 Floración de la Unidades 4, 7 y 9 serie “B”, *Lobivia arachnacantha* injertada sobre el patrón *Myrtillocactus geometrizans*, botón floral y floración del 7 de julio (Pérez Gustavo, 2023).

En los injertos de la especie *Gymnocalycium mihanovichii* sobre los patrones *Myrtillocactus geometrizans* e *Hylocereus undatus*, no se obtuvieron brotes florales durante el periodo de estudio de 6 meses (180 días).

Los injertos realizados en el patrón *Hylocereus undatus* no presentaron botones florales en ninguna de las repeticiones, así como tampoco mostraron brotación de hijuelos. Esto indica que no se logró una adecuada unión de los haces vasculares, lo cual probablemente se deba a un problema de incompatibilidad entre estas especies. Lo anterior concuerda con lo señalado por Hartmann y Kester (1988), quienes indican que cuando un injerto falla en formar una unión en un gran porcentaje de los casos, la causa principal es la incompatibilidad.

CONCLUSIONES.

Los dos patrones proporcionaron al injerto el 100 % de supervivencia en las tres especies evaluadas, tanto durante como después del periodo de 180 días de estudio. Esto permite asegurar que la técnica es eficiente y eficaz cuando se desea obtener un rápido crecimiento, floración y brotación en un tiempo menor en comparación con las plantas de pie franco.

Los mejores resultados se obtuvieron en los injertos sobre *Myrtillocactus geometrizans*, ya que en las especies *Astrophytum asterias* y *Lobivia arachnacantha* se registró floración entre el tercer y quinto mes de haber sido injertadas. Por el contrario, *Gymnocalycium mihanovichii* no presentó floración en ninguno de los dos portainjertos, lo cual puede deberse a su lento crecimiento y maduración, características que hacen inusual la floración en esta especie de cactácea a una corta edad.

El injerto ejerce influencia sobre la maduración sexual, sobre todo cuando se utiliza el portainjerto *Myrtillocactus geometrizans*. En las especies bajo estudio, la fenología normal de floración para plantas obtenidas por semilla es de 3 a 5 años para *Astrophytum asterias*, de 2 a 4 años para *Lobivia arachnacantha* y de 2 a 3 años para *Gymnocalycium mihanovichii*; sin embargo, mediante el injerto se obtuvieron floraciones en las dos primeras especies a los 3 y 5 meses, utilizando plantas injertadas de solo un año de edad.

Esta técnica permite inducir floraciones tempranas para la obtención de semillas, lo que aseguraría la diversidad genética necesaria para su conservación, con el fin de mitigar la extracción ilegal y el peligro constante de que estas especies desaparezcan por completo de su hábitat.

REFERENCIAS.

- Alanís, G. F. (2001). Saqueo y tráfico de cactáceas, un detrimento patrimonial de recursos naturales. En G. F. Alanís y M. A. Ledezma (Eds.), *Memoria 3er. Taller regional de cactáceas del noreste de México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Anderson, E. F. (2001). *The cactus family*. Timber Press.
- Arias, S., y Aquino, D. (2019). Familia Cactaceae I. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*, 209, 1-295.
- Bravo-Hollis, H. (1978). *Las cactáceas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Buining, A. F. H., y Ritter, F. (1974). *Lobivia arachnacantha* Buining et Ritter sp. nov. *Succulenta*, 53(3), 42-44. (Nota: Si en tu texto utilizas la transferencia taxonómica hecha por Friedrich, la cita se escribe: Friedrich, H. (1974). *Echinopsis arachnacantha*. *Kakteen und andere Sukkulanten*, 25(4), 82).
- Duarte, M., Guerrero, P. C., Carvallo, G., y Bustamante, R. O. (2014). Conservation network design for endemic cacti under taxonomic uncertainty. *Biological Conservation*, 176, 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.024>
- Estrada-Arellano, J. R., Estrada-Castillón, A. E., Salinas-Rodríguez, M. M., Sánchez-Salas, J., y Rueda-Puente, C. Márquez-Hernández. (2018). Cactus diversity in the Sierra del Rosario, Durango, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 133-141. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1415>

- Godínez, H. A. (1994). Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botánica Mexicana*, (26), 33-52. <https://doi.org/10.21829/abm26.1994.691>
- Hartmann, H. T., y Kester, D. E. (2002). *Plant propagation: Principles and practices* (7.^a ed.). Prentice Hall. (Nota: Corregido del original "Harman and M. Kester's" al nombre oficial de los autores del área).
- Hernández, H. M., y Bárcenas, R. T. (1994). Endangered cacti in the Chihuahuan Desert: Distribution patterns. *Conservation Biology*, 9(5), 1176-1188. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.9051176.x>
- Hunt, D. (Comp.). (1992). *CITES Cactaceae checklist*. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Kiesling, R., Larrocca, L., Faúndez, J., Metzging, D., y Albesiano, S. (2008). Cactaceae. En F. O. Zuloaga, O. Morrone, y M. J. Belgrano (Eds.), *Catálogo de las Plantas Vasculares del Cono Sur* (Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden, Vol. 107, Vol. 2, pp. 1715-1830). Missouri Botanical Garden Press.
- Le Bellec, F., y Vaillant, F. (2011). Pitahaya (pitaya) (*Hylocereus* spp.). En *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 247-273). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092618.247>
- Lüthy, J. (1995). *Taxonomische Untersuchung der Gattung Mammillaria Haw (Cactaceae)*. Arbeitskreises für Mammillarienfreunde.
- Meza-Rangel, E., Tafoya, F., Lindig-Cisneros, R., Sigala-Rodríguez, J., y Pérez, E. (2014). Distribución actual y potencial de las cactáceas *Ferocactus histrix*, *Mammillaria bombycina* y *M. perezdelarosae* en el estado de Aguascalientes, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 22(62), 12-21.
- Pérez Gonzalez, G, Tesis Propagación y Conservación de Tres Géneros de Cactáceas Mediante Técnica de Injerto (Corona) en 2 Portainjertos., https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/8691/1/BIO_18883495_GUSTAVO%20PEREZ%20GONZALEZ_TESIS%20PROFESIONAL.pdf
- Rocha, L. (1995). *Estudio poblacional del "Falso peyote" Astrophytum asterias (Zucc.) Lem. (Cactaceae) en una fracción del matorral espinoso tamaulipeco en Villagrán, Tamaulipas, México* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rodríguez, C. A. (2000). *Pitahayas: Estado mundial de su cultivo y comercialización* (pp. 1-22). Fundación Yucatán Produce A.C.; Universidad Autónoma Chapingo.

Toogood, A. (2002). *Propagating plants*. Dorling Kindersley; Royal Horticultural Society.

Zee, F., Yen, C., y Nishina, M. (2004). *Pitaya (Dragon fruit, strawberry pear)* (Cooperative Extension Service, Pg. 3). College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa.

APROVECHAMIENTO DE SEDIMENTOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN EL DESARROLLO VEGETATIVO

José Antonio Fernández Viveros¹

Félix David Murillo Cuevas²

Jacel Adame García³

Adriana Elena Rivera Meza⁴

RESUMEN

En los últimos años se ha utilizado a los humedales construidos como un recurso ecotecnológico para tratar diferentes tipos de aguas residuales, sin embargo, estos sistemas de tratamiento como cualquier otro, conlleva ventajas y ciertas desventajas dentro de las cuales, los residuos (sedimentos), que se mantienen entre el sustrato y el fondo al final de su vida útil del Humedal son generalmente desechados en la limpieza de los mismos. Esto representa nuevamente focos de contaminación potenciales. Por otro lado, estos residuos presentan alta carga orgánica, algunos minerales y macroorganismos generalmente degradadores que pueden ser benéficos por sus aportes y potenciales para ciertos cultivos como las hortalizas. Este trabajo tiene como objetivo demostrar que los sedimentos de un humedal construido tienen potencial en el desarrollo vegetal de hortalizas, dando solución a la generación de estos desechos mediante su reutilización de manera racional como potencializador del desarrollo vegetativo.

Palabras clave: Tratamiento de aguas, bioestimulante, hortalizas

INTRODUCCIÓN

Los humedales construidos han adquirido una creciente relevancia como sistemas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales, agroindustriales y agrícolas. Su funcionamiento se basa en la interacción de procesos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que permiten la remoción de contaminantes mediante la acción conjunta del sustrato, las plantas acuáticas y las comunidades microbianas asociadas (Wang et al., 2017; Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2018).

Estos sistemas reproducen de manera controlada los procesos naturales que ocurren en los humedales, utilizando especies vegetales adaptadas a condiciones de inundación permanente o

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jose.fv@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. felix.mc@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. jacel.ag@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. adriana.rm@ugalvan.tecnm.mx

temporal. Las macrófitas desempeñan un papel fundamental en estos sistemas al favorecer la transferencia de oxígeno hacia la rizosfera, proporcionar superficie para el crecimiento microbiano y contribuir a la absorción de nutrientes y contaminantes (Brix, 1997; Vymazal, 2011).

Las raíces y rizomas de estas plantas favorecen la oxigenación parcial del medio, proporcionan soporte para el desarrollo microbiano y contribuyen a la absorción de nutrientes y contaminantes presentes en el agua residual (Curt, 2005; Zhang et al., 2014; Zurita-Martínez et al., 2011). Entre las especies más utilizadas en humedales construidos destacan *Canna indica*, *Cyperus papyrus*, *Iris sibirica* y *Typha latifolia*, las cuales han demostrado una elevada capacidad de adaptación y eficiencia en procesos de depuración (Tejeda et al., 2022).

A pesar de las ventajas ambientales y operativas de estos sistemas, uno de los principales desafíos asociados a su manejo corresponde a la disposición final de los residuos sólidos generados durante su operación. Con el tiempo, la acumulación de lodos y sedimentos provoca fenómenos de colmatación que reducen la eficiencia hidráulica del sistema y hacen necesario su retiro periódico. Tradicionalmente, estos materiales son considerados residuos y se eliminan sin un aprovechamiento posterior, lo que puede representar un riesgo ambiental si no se manejan adecuadamente (Zurita et al., 2009).

Diversas investigaciones han señalado que los sedimentos procedentes de humedales construidos contienen cantidades significativas de materia orgánica, nutrientes y microorganismos benéficos, lo que abre la posibilidad de valorizarlos como insumos agrícolas. Gaitán-Zamora (2022) reportó que estos materiales pueden incorporarse a procesos de compostaje y utilizarse posteriormente en cultivos agrícolas, reduciendo la generación de residuos y promoviendo estrategias de economía circular. Asimismo, estudios realizados con biosólidos y lodos provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales han demostrado efectos positivos sobre la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas, debido a su aporte de nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal.

En este contexto, el aprovechamiento agrícola de los sedimentos generados en humedales construidos representa una alternativa viable para transformar un residuo potencialmente contaminante en un recurso de valor agregado. Sin embargo, su utilización debe realizarse bajo criterios de seguridad ambiental, considerando la posible presencia de metales pesados, compuestos tóxicos o microorganismos patógenos derivados de la naturaleza del agua tratada.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial de los sedimentos provenientes de un humedal construido híbrido utilizado para el tratamiento de aguas residuales de una cooperativa escolar, determinando su efecto como bioestimulante en el crecimiento y desarrollo de plántulas de chile.

CONTENIDO

El estudio se desarrolló en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México, campus Úrsulo Galván, ubicado en el Km 4.5 de la carretera Cardel–Chachalacas, municipio de Úrsulo Galván, Veracruz, México. La institución cuenta con diversas áreas destinadas a la preparación y venta de alimentos que brindan servicio a aproximadamente 800 personas por día. Las actividades de lavado de utensilios, recipientes y equipos de cocina generan aguas residuales con presencia de restos de alimentos, grasas, detergentes y otros compuestos orgánicos que, en ausencia de tratamiento, representan una fuente potencial de contaminación ambiental.

Para el tratamiento de estas aguas residuales se empleó un sistema de humedales construidos híbridos a escala mesocosmo. Cada unidad experimental estuvo conformada por dos etapas de tratamiento conectadas en serie: un humedal vertical de flujo libre (HCV-FL) con dimensiones de 50 cm × 50 cm de base y 1 m de altura, seguido de un humedal horizontal de flujo subsuperficial (HCH) con dimensiones de 50 cm de ancho, 50 cm de profundidad y 2 m de longitud. Las estructuras fueron construidas con block, cemento y tubería de PVC (Figura 1).

Cada conjunto integrado por un humedal vertical y uno horizontal se consideró un tren de tratamiento independiente. Como medio filtrante se utilizó grava volcánica roja, material ampliamente empleado en humedales construidos debido a su elevada porosidad y capacidad de soporte para el crecimiento microbiano.

Los humedales se plantaron con dos especies ornamentales frecuentemente utilizadas en procesos de fitodepuración: *Canna indica* L. y *Canna discolor* Lindl. Cada tratamiento se estableció por triplicado. En los humedales verticales se colocaron cuatro individuos por unidad experimental, mientras que en los humedales horizontales se establecieron cinco individuos de cada especie, para un total de diez plantas por sistema.

Las aguas residuales se recolectaron directamente del área de lavado de utensilios de una cooperativa escolar. Previamente a su ingreso al sistema de tratamiento se realizó una remoción de sólidos gruesos mediante un sistema de filtración mecánica compuesto por doble malla tipo mosquitero. Cada humedal recibió una carga hidráulica de 40 L de agua residual aplicada inicialmente al componente vertical. Posteriormente, el efluente alimentó el humedal horizontal, donde permaneció durante un tiempo de retención hidráulica aproximado de 24 horas.



Figura 1. Representación del Sistema de Humedales Construidos Híbridos del IT de Úrsulo Galván. Imagen generada con IA.

Los sistemas operaron de manera continua durante un periodo de doce meses, permitiendo la acumulación progresiva de sedimentos y materia orgánica en el sustrato y fondo de los humedales. Al finalizar el periodo de operación, los sedimentos acumulados (Figura 2) en los humedales con *Canna indica* y *Canna discolor* se recolectaron manualmente y se almacenaron bajo condiciones de refrigeración hasta su utilización en los ensayos de crecimiento vegetal.



Figura 2. Sedimentos acumulados de los humedales construidos.

Para evaluar el potencial bioestimulante de los sedimentos se utilizaron semillas de chile (*Capsicum annuum* L.). Se establecieron cinco tratamientos:



Figura 3. Tratamientos establecidos para la evaluación de los sedimentos.

Cada tratamiento contó con 25 repeticiones distribuidas bajo un diseño completamente al azar. Las semillas se sembraron en bolsas de vivero que contenían 300 g de suelo agrícola. A partir de la emergencia de las plántulas, se aplicaron semanalmente 50 mL de la solución correspondiente a cada tratamiento durante un periodo de 60 días. En el tratamiento testigo se aplicó únicamente agua potable. A los 60 días después de la siembra se evaluaron las variables de crecimiento de las plántulas de chile mediante la medición de la altura de planta y el diámetro de tallo. La altura de planta (cm) se determinó desde la superficie del sustrato hasta la yema apical utilizando una regla graduada, mientras que el diámetro del tallo (mm) se midió en la base de la planta con ayuda de un vernier digital. Los datos obtenidos para ambas variables permitieron comparar el efecto de los diferentes tratamientos elaborados con sedimentos provenientes de humedales construidos sobre el desarrollo vegetativo de las plántulas. Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva, obteniendo los valores promedio para cada variable evaluada.

RESULTADOS

Después de 60 días de aplicación semanal de los tratamientos elaborados con sedimentos provenientes de humedales construidos, se observaron diferencias en las variables de crecimiento evaluadas en las plántulas de chile. Los valores promedio de altura de planta obtenidos para cada tratamiento se presentan en la Figura 4.

Los resultados muestran que las plántulas tratadas con sedimentos provenientes de humedales vegetados con *Canna discolor* presentaron los mayores valores de altura, particularmente en la concentración del 50%, alcanzando un promedio de 28.84 cm. Este valor representó un incremento de 29.6% respecto al tratamiento testigo. El tratamiento con sedimentos de *C. discolor* al 25 % superó en 15.6 % la altura observada en las plantas testigo.

En el caso de los sedimentos procedentes de *Canna indica*, la concentración del 50% también promovió un mayor crecimiento en comparación con el testigo, mientras que la concentración del 25% mostró un comportamiento ligeramente inferior. Estos resultados sugieren que la respuesta de las plántulas estuvo influenciada tanto por el origen de los sedimentos como por la concentración aplicada. El incremento en la altura de las plantas podría estar asociado a la presencia de materia orgánica, nutrientes minerales y compuestos bioactivos acumulados en los sedimentos durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales. Estos componentes pueden favorecer la disponibilidad de nutrientes y estimular procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetal. Por otra parte, el diámetro del tallo mostró una tendencia similar a la observada para la altura de planta (Figura 5).

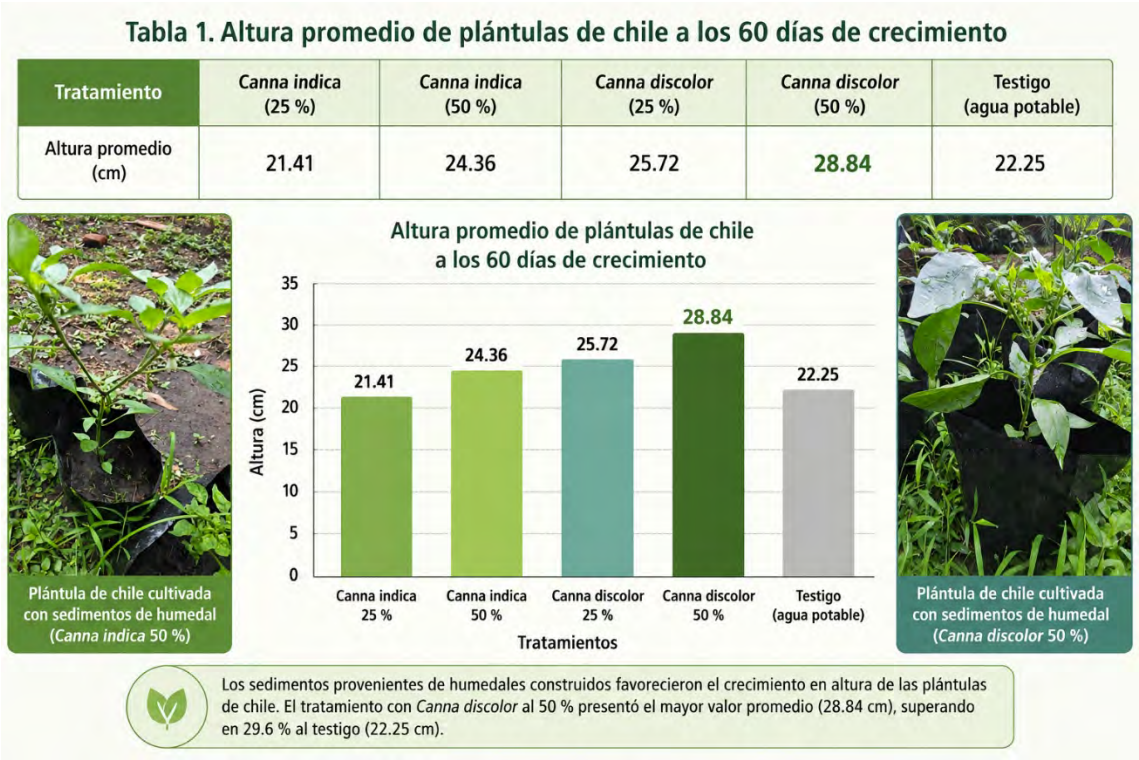


Figura 4. Valores promedio de altura de planta obtenidos para cada tratamiento. Imagen generada con IA.

Todos los tratamientos elaborados con sedimentos produjeron diámetros de tallo superiores al tratamiento testigo. El mayor valor se registró en el tratamiento con sedimentos provenientes de *C. indica* al 25%, con un promedio de 4.34 mm, lo que representa un incremento aproximado de 28.8% respecto al control. De manera similar, los demás tratamientos presentaron aumentos comprendidos entre 22.5 y 27.0% en comparación con las plantas irrigadas únicamente con agua.



Figura 5. Diámetro promedio del tallo de plántulas de chile a los 60 días de crecimiento. Imagen generada con IA.

El aumento en el diámetro del tallo constituye un indicador importante de vigor vegetal, ya que refleja una mayor acumulación de biomasa y una mejor capacidad de transporte de agua y nutrientes dentro de la planta. En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que los sedimentos provenientes de humedales construidos favorecieron el desarrollo estructural de las plántulas de Chile.

En términos generales, los tratamientos que incorporaron sedimentos mostraron un desempeño superior al testigo tanto en altura como en diámetro de tallo. Estos hallazgos evidencian el potencial de los sedimentos generados en humedales construidos como insumos agrícolas alternativos para estimular el crecimiento vegetativo en etapas tempranas del desarrollo de cultivos hortícolas. No obstante, para confirmar estadísticamente estas tendencias, se recomienda complementar futuras investigaciones con análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple de medias que permitan determinar la significancia de las diferencias observadas entre tratamientos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidenciaron que los sedimentos provenientes de humedales construidos favorecieron el desarrollo vegetativo de las plántulas de Chile, reflejado en incrementos tanto en la altura de planta como en el diámetro del tallo en comparación con el tratamiento testigo. Estos hallazgos sugieren que los sedimentos acumulados durante la operación de los humedales no constituyen únicamente un residuo del proceso de tratamiento, sino que representan una fuente potencial de nutrientes y compuestos bioactivos con capacidad para estimular el crecimiento vegetal.

El mayor crecimiento en altura observado en los tratamientos con sedimentos provenientes de humedales vegetados con *Canna discolor*, particularmente en la concentración del 50 %, podría estar relacionado con una mayor acumulación de materia orgánica y nutrientes disponibles en este tipo de sistemas. Diversos estudios han demostrado que los sedimentos generados en humedales construidos concentran nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, además de compuestos húmicos que pueden mejorar la fertilidad del suelo y favorecer el crecimiento de las plantas (Żukowska et al., 2026; Wortmann e Iqbal, 2022). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Singh y Agrawal (2008), quienes señalaron que los biosólidos y lodos estabilizados pueden mejorar significativamente el crecimiento vegetal debido al aporte de materia orgánica y nutrientes esenciales. Los incrementos observados en el diámetro del tallo indican una mejora en el vigor vegetativo de las plántulas. Un mayor grosor del tallo suele asociarse con una mayor acumulación de biomasa, mejor capacidad de transporte de agua y nutrientes y una mayor resistencia mecánica de la planta. Este comportamiento coincide con lo reportado por Singh y Agrawal (2008), quienes señalaron que la aplicación de biosólidos y lodos estabilizados puede incrementar significativamente los parámetros de

crecimiento vegetal debido al aporte de nutrimentos esenciales y a la mejora de las propiedades físicas del suelo.

Los resultados también concuerdan con lo reportado por Lu et al. (2012), quienes encontraron que la incorporación de biosólidos al suelo incrementa la disponibilidad de nutrientes y estimula la actividad microbiana, favoreciendo el desarrollo radicular y la absorción de elementos minerales. De manera similar, Malacatus et al. (2019) documentaron concentraciones importantes de fósforo y otros nutrientes en lodos provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales, destacando su potencial para aplicaciones agrícolas.

Otro aspecto relevante es el posible papel de los microorganismos presentes en los sedimentos. Durante el funcionamiento de los humedales construidos se desarrollan comunidades microbianas responsables de la degradación de materia orgánica y de la transformación de nutrientes. Parte de estas poblaciones microbianas pueden permanecer en los sedimentos extraídos y actuar como promotores indirectos del crecimiento vegetal al favorecer procesos de mineralización, solubilización de nutrientes y mejoramiento de la actividad biológica del suelo (Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2018).

Desde una perspectiva ambiental, los resultados obtenidos adquieren especial relevancia debido a que ofrecen una alternativa para la valorización de los residuos generados durante la operación y mantenimiento de humedales construidos. Tradicionalmente, estos sedimentos son retirados y enviados a disposición final, lo que implica costos de manejo y riesgos potenciales de contaminación. Su aprovechamiento como bioestimulantes o acondicionadores orgánicos puede contribuir a la implementación de estrategias de economía circular, promoviendo el reciclaje de nutrientes y reduciendo la generación de residuos.

La acumulación de nutrientes en los sedimentos de humedales construidos es una consecuencia natural de los procesos de retención y transformación biogeoquímica que ocurren durante el tratamiento de las aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2018).

No obstante, aunque los resultados fueron favorables, es importante considerar que la calidad de los sedimentos depende directamente de las características del agua residual tratada. Cuando los humedales reciben efluentes con presencia de metales pesados, compuestos tóxicos o microorganismos patógenos, dichos contaminantes pueden acumularse en los sedimentos. Por esta razón, antes de recomendar su aplicación agrícola a gran escala, es indispensable realizar análisis fisicoquímicos, microbiológicos y toxicológicos que permitan garantizar su inocuidad y minimizar posibles riesgos ambientales y sanitarios.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen una evidencia preliminar del potencial agronómico de los sedimentos provenientes de humedales construidos utilizados para el tratamiento de aguas residuales de origen alimentario. Sin embargo, futuras investigaciones deberán evaluar diferentes dosis de aplicación, realizar análisis nutrimentales de los sedimentos y determinar sus efectos sobre variables fisiológicas, rendimiento y calidad de los cultivos, con el fin de establecer criterios técnicos para su aprovechamiento seguro y eficiente.

Los sedimentos provenientes de humedales construidos híbridos utilizados para el tratamiento de aguas residuales de una cooperativa escolar mostraron potencial para promover el desarrollo vegetativo de plántulas de chile, evidenciado por incrementos en la altura de planta y el diámetro del tallo en comparación con el tratamiento testigo.

El tratamiento elaborado con sedimentos procedentes de humedales vegetados con *Canna discolor* a una concentración del 50% presentó los mayores valores de crecimiento en altura, mientras que los tratamientos derivados de *Canna indica* mostraron los mayores diámetros de tallo. Estos resultados sugieren que la composición de los sedimentos y la especie vegetal asociada al humedal pueden influir en su capacidad bioestimulante.

Los efectos observados pueden atribuirse al aporte de materia orgánica, nutrientes minerales y microorganismos benéficos acumulados en los sedimentos durante el proceso de depuración de las aguas residuales, lo que favorece el crecimiento y vigor de las plántulas.

Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento de estos sedimentos representa una alternativa viable para transformar un residuo potencialmente contaminante en un recurso con valor agregado para la producción agrícola, contribuyendo al reciclaje de nutrientes y al fortalecimiento de estrategias de economía circular.

No obstante, previo a su aplicación agrícola, es indispensable realizar análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de contaminantes potenciales, particularmente metales pesados y microorganismos patógenos, con el propósito de garantizar la seguridad ambiental y sanitaria de su uso.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen análisis estadísticos inferenciales, caracterización química de los sedimentos y evaluaciones en condiciones de campo, con el fin de validar su potencial como bioestimulantes y establecer protocolos de aplicación para diferentes cultivos de interés agrícola.

REFERENCIAS

- Curt, M. D. (2005). Fitodepuración en humedales: Conceptos generales. En J. Fernández (Ed.), *Manual de fitodepuración: Filtros de macrófitas en flotación* (pp. 61–77). Fundación Global Nature, Universidad Politécnica de Madrid y Ayuntamiento de Lorca.
- Gaitán-Zamora, N. A. (2022). Nuevo acercamiento al aprovechamiento de los residuos de humedales artificiales basado en estudios a escala prototipo y de laboratorio. *Ambiens Techné et Scientia México*, 10(1), 11–62.
- Gustavo, C. S. J., David, B. S. L., Belén, V. O. M., & Andrés, Z. R. H. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(3), 73–82.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
- Malacatus Cobos, P. N., Bastidas Chávez, P. I., & Chuquitarco Moreno, P. A. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 8(2), 30–38. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40113786003.pdf>
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Tejeda, A., Valencia-Botín, A. J., & Zurita, F. (2022). Resistance evaluation of *Canna indica*, *Cyperus papyrus*, *Iris sibirica*, and *Typha latifolia* to phytotoxic characteristics of diluted tequila vinasses in wetland microcosms. *International Journal of Phytoremediation*, 24(12), 1267–1276. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2043501>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
- Vymazal, J. (2018). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 10(1), 5. <https://doi.org/10.3390/w10010005>
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>
- Wortmann, C. S., & Iqbal, J. (2022). Utilización de lodos de depuradora para la producción de cultivos (NebGuide G1939, revisión de julio de 2022). Nebraska Extension. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1939s/2022/pdf/view/g1939s-2022.pdf>
- Zhang, D. Q., Gersberg, R. M., Ng, W. J., & Tan, S. K. (2014). Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: A review. *Environmental Pollution*, 184, 620–639. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.09.009>

- Žukowska, G., Bik-Małodzińska, M., & Myszura-Dymek, M. (2026). The influence of stabilization technology on selected properties of municipal sewage sludge. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 20(1), 279–287.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5), 11–17. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0104>
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861–869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>
- Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(SPE1), 139–150.

EVALUACIÓN DE *Pleurotus djamor* EN DIAS A LA APARICION DE PRIMORDIOS EN 4 MEZCLAS INTERGENERICAS

Juana Fabiola Jiménez Flores¹

Daniel Utrera López²

Ramiro Sánchez Uranga³

Montserrat Acosta Cadenas⁴

Pedro Acosta Alarcón⁵

RESUMEN

El cultivo de hongos comestibles representa una alternativa sustentable y sostenible para el aprovechamiento de residuos agrícolas, debido a su capacidad de transformar materiales lignocelulósicos en biomasa de alto valor nutricional. Entre las especies de importancia comercial destaca *Pleurotus djamor* conocido como hongo ostra rosado y *Pleurotus ostreatus*, debido a su rápido crecimiento, atractiva coloración y adaptación a diferentes sustratos. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los días transcurridos desde la siembra hasta la aparición de los primeros primordios de *Pleurotus djamor* en cuatro mezclas agrícolas: T1 Rastrojo de maíz y cebada, T2 Rastrojo de maíz y olote, T3 Rastrojo de frijol y cebada, T4 Rastrojo de frijol y rastrojo de maíz. Se empleó un diseño completamente al azar 4 X 25. Se utilizaron bolsas de polietileno de 40 x 60 cm con un peso de 5 Kg de sustrato húmedo.

El tratamiento sobresaliente a la variable días a la aparición de primordios fue Tratamiento 3 Mezcla de Rastrojo de frijol y cebada con una media 33.563 días, recomendado para contribuir al desarrollo de sistemas de producción más eficientes y sostenibles. Los resultados obtenidos permitirán hacer recomendaciones a productores interesados en el cultivo comercial de esta especie de hongo.

Palabras clave: *Pleurotus djamor*, primordios, sustratos agrícolas, residuos lignocelulósicos, producción de hongos.

INTRODUCCION

La producción del género *Pleurotus* sp. es de 797 000 t/año se encuentra en tercer lugar a nivel mundial entre los hongos comestibles. Estas setas crecen en una gran variedad de sustratos provenientes de la industria forestal y residuos agrícolas como: aserrines, restos de maderas, rastrojo de maíz (*Zea mayz* L), cebada (*Hordeum vulgare* L) y trigo (*Triticum* spp L), subproductos del

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Juana.jf@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. daniel.ul@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. ramiro.su@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. monserrat.ac@ugalvan.tecnm.mx

⁵ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. acosta235@hotmail.com

procesamiento del café (*Coffea spp* L), hojas de plátano (*Musa paradisiaca* L) y hasta en ramas provenientes de podas (López, 2014). En sí, el material lignocelulósico es el sustrato más apropiado para el crecimiento tecnificado de este tipo de macromicetos. En México se han encontrado en zonas cálidas creciendo sobre algunas variedades de troncos en descomposición designando a sus fructificaciones como orejas de patancán, orejas de izote u orejas de cazahuate (Salmones et al., 2004).

La importancia de los rastrojos, que han pasado en el olvido por los sectores académico y gubernamental en México, como lo demuestra la limitada información científica que existe sobre ellos. Asimismo, es evidente que no se han tomado en cuenta explícitamente en políticas y estrategias gubernamentales que buscan la sustentabilidad en el medio rural. De ahí la necesidad de documentar en la actualidad de los rastrojos en México, qué se hace con ellos, cómo se aprovechan, qué papeles juegan en la actividad agropecuaria y cuál es su contribución futura para alcanzar la sustentabilidad. En México, el mayor volumen de rastrojos se obtiene de los cereales y está asociado directamente con la producción de granos por lo que, conforme aumenta la cantidad de granos producida para satisfacer la demanda alimenticia de la población, aumenta la disponibilidad de estos residuos (Montalvo Macuixtle, 2016).

Los residuos agrícolas disponibles en cada región presentan diferencias significativas en su composición química y estructura física, lo que puede afectar la velocidad de colonización del micelio y la aparición de primordios. Debido a estas variaciones, no todos los sustratos ofrecen las mismas condiciones para el desarrollo fisiológico del hongo. La falta de información específica sobre el comportamiento de *Pleurotus djamor* en distintos residuos agrícolas limita la adopción de tecnologías de producción más eficientes. El principal problema el cual se presenta es el aumento de los desperdicios sólidos orgánicos e inorgánicos que se presentan en la agroindustria en la comunidad de barra de chachalacas sus habitantes tienen como actividad la agricultura donde muchos sustratos son utilizados para la alimentación y crecimiento de ganado ya sea el maíz, olote, leguminosas entre otras la parte restante de los sustratos son desechados o quemados perjudicando con ello al medio ambiente ya sean río, lagunas, bosques así como la salud del ser humano (Acosta Alarcón, 2019). Sin embargo, uno de los principales desafíos en la producción comercial de *Pleurotus djamor* es la selección de un sustrato adecuado que permita acelerar el desarrollo del cultivo y optimizar el tiempo de producción. La finalidad del estudio fue evaluar los días transcurridos desde la siembra hasta la aparición de los primeros primordios de *Pleurotus djamor* en cuatro mezclas de sustratos agrícolas.

MARCO TEORICO

Características generales de los hongos seta

Antiguamente, los hongos y setas eran considerados plantas por su inmovilidad y por crecer en la tierra, por lo que han sido estudiados, tradicionalmente, por la botánica. Pero a medida que se fue avanzando en estudios de biología se fueron separando del reino vegetal, ya que no poseen clorofila y, por lo tanto, no realizan la fotosíntesis, siendo ésta la principal característica de las plantas.

Podría englobarse en el reino animal, pero tampoco acabarían por encajar, por lo que la solución pasaría por la clasificación de los seres vivos en cinco reinos y uno de estos reinos es el fungí, al que pertenecen las setas y los hongos, que incluyen más de 100.000 especies. Este reino hizo necesario la aparición de una nueva ciencia que se encargara de su estudio, es la micología (Alzueta, 2018).

Clasificación taxonómica

Reino: Fungí

División: Basidiomycotina

Clase: Himenomycetes

Orden: Agaricales

Familia: Tricholomataceae

Género: Pleurotus

Especie: *P. djamor* (Peralta E. L., 2008).

Pleurotus djamor (Rumph.: Fr.) Boedijn fue originalmente descrito por Fríes en 1821, como *Agaricus djamor*. Posteriormente Boedijn, en 1959, lo transfirió al género *Pleurotus* de la familia *Pleurotaceae*.

De acuerdo con Pegler, *P. djamor* es la especie pantropical más importante y abundante del género *Pleurotus*, consideró que *P. djamor* es sinónimo de *P. flabellatus*, *P. eous* y *P. salmoneostramineus*. En el continente americano se le ha encontrado creciendo silvestre en Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Guadalupe, Guatemala, Martinica, México, Panamá, Puerto Rico y Venezuela; aunque probablemente tiene una distribución más amplia (salomones, 2017).

Describió a la especie con basidiomas de color blanco a blanquecino, aunque previamente había observado una amplia variabilidad micromorfológica entre los especímenes estudiados provenientes de Malasia, determinando que esta especie podría clasificarse en seis variedades de acuerdo con su variabilidad en color, micromorfología y hábitat, además de presentar especímenes de clasificación intermedia entre las variedades establecidas. también notaron diferencias de coloración en los píleos de la especie estudiados, desde blanquecino a grisáceo o rosáceo, proponiendo una posible sinonimia con otras especies de *Pleurotus*, como *P. salmoneostramineus* y *P. ostreatoroseus*. Esta última especie fue estudiada por Murakami y Takemaru (1990), quienes observaron la formación de basidiocarpos blancos en la progenie de cepas de *P. ostreatoroseus* cultivadas en el laboratorio, por lo que

consideraron que la variabilidad de color entre los especímenes silvestres y cultivados se debía a mutaciones controladas por genes recesivos. Paralelamente, Neda et al. (1988) descubrieron que los especímenes identificados como *P. salmoneostramineus* eran compatibles con aquellos registrados como *P. djamor*, concluyendo que las diferencias de color entre los basidiomas y basidiosporas no eran un factor determinante para separar a los especímenes en dos especies; coincidiendo con Petersen y Hughes (1993) quienes encontraron que *P. ostreatoroseus* y *P. salmoneostramineus* eran genéticamente compatibles. Estudios posteriores mostraron compatibilidad entre las formas rosas y blancas (Petersen y Ridley, 1996, Nicholl y Petersen, 2000, Gaitán-Hernández y Salmones, 1999; Salmones et al., 2004), por lo que Guzmán et al. (1995) describieron tres variedades ecológicas en la especie: *P. djamor* (Fr.) Boedijn var. *djamor*, caracterizada por desarrollar primordios y basidiomas blanquecinos; *P. djamor* var. *roseus* Corner, conformada por individuos que presentan primordios de color rosa y/o naranja que disminuyen notoriamente su coloración en estado adulto y *P. djamor* var. *salmoneostramineus*, que se distingue por presentar primordios y basidiomas adultos de color rosa y/o naranja. Posteriormente, Lechner et al. (2004) incorporaron la variedad *cyathiformis* Corner, caracterizada por representar basidiomas blanquecinos con manchas oscuras sobre el píleo (Salomones, 2017).

Con la incorporación de técnicas moleculares y bioquímicas en los estudios sistemáticos del género *Pleurotus*, la ubicación taxonómica de esta especie fue mejor definida después de analizar zimogramas de progenies homocarióticos y realizar pruebas enzimáticas con 11 especies de *Pleurotus* determinaron que *P. djamor* (citada como *P. flabellatus*) es una especie bien definida y separada de *P. cornucopiae*, *P. cystidiosus*, *P. eryngii*, *P. ostreatus* y *P. pulmonarius*. Por otra parte, Iracabal et al. (1995) obtuvieron unidades de ADN ribosomal de *P. cornucopiae* con la finalidad de hibridizarlas con 11 taxa de *Pleurotus*, observando alta heterogeneidad entre los taxa y definiendo claramente tres especies: *P. dryinus*, *P. eryngii* y *P. flabellatus* (*P. djamor*), las cuales presentaron grandes distancias fenéticas con el resto de los taxones estudiados (Salomones, 2017).

interesante destacar que la permanencia del color rosa en los basidiomas es una parte de la biología del hongo aún no concluyente, que ha generado conclusiones opuestas en los trabajos publicados, ya que mientras citaron que la pérdida del color rosa en las fructificaciones cultivadas de una cepa mexicana de *P. ostreatoroseus* se debía a una alta intensidad lumínica en las áreas de cultivo, otros autores no encontraron correlación entre las variaciones de color rosa de los basidiomas y la intensidad de luz empleada durante el desarrollo de los mismos. Probablemente esto se debe a que la permanencia del color depende, tanto de las características genéticas de los parentales como de las condiciones de cultivo y ambientales en que se desarrollan los esporomas, de igual manera a lo reportado para otras especies del género. Con referencia a su genética, presenta un patrón de

sexualidad heterotálico tetrapolar, es decir sus talos o estructuras miceliales son auto estériles, por lo que para obtener descendencia se necesitan entrecruzar talos compatibles en dos pares de factores (A y B), localizados en dos cromosomas diferentes. James et al. (2004) reportó que la segregación de las secuencias de ADN en las regiones genómicas de la especie revelaba un par de genes homodominantes en el factor A y tres pares de receptores feromonales en el factor B, sugiriendo que las bases genéticas de *P. djamor* son similares a las de otras especies de hongos (Salomones, 2017).

VALOR NUTRIMENTAL Los esporomas de *P. djamor* presentan un aceptable contenido nutrimental. Estos hongos son especialmente ricos en carbohidratos, con 32.7 a 48.3 g por cada 100 g de hongo (base seca) y proteína cruda de 20.7 a 28 g, con valores recomendables de fibra cruda (9.1 a 22.4 g) y cenizas (4.1 a 7.4 g), baja cantidad de grasas (0.11 a 2.09 g) y alta humedad (79.5 a 90%) La calidad nutrimental de la proteína de los hongos ha sido ampliamente estudiada, ya que una de las más importantes características biológicas de estos organismos son su capacidad de obtener el nitrógeno del sustrato de crecimiento y posteriormente sintetizarlo y transformarlo en aminoácidos. En este punto, los hongos del género *Pleurotus* son especialmente interesantes porque ellos pueden crecer en residuos lignocelulósicos con muy bajo contenido de nitrógeno, teniendo la capacidad de producir biomasa con mayor contenido de nitrógeno que el sustrato en el que están creciendo. Su calidad de proteína es alta, ya que está constituida principalmente por aminoácidos esenciales entre los que destacan la valina, isoleucina y fenilalanina, aunque también presentan valores aceptables de aminoácidos no esenciales como son, prolina, glutamato y aspartato.

También contienen vitaminas, especialmente del complejo B (B1, B2) y D, además de los minerales K, P, Mg, Ca, Na, Zn, Fe, entre los más frecuentes, por lo que los hongos se consideran una buena fuente de K y P. Con base en su contenido nutrimental, *Pleurotus djamor*, y en general los hongos comestibles, son un alimento altamente recomendado para diversos tipos de dietas (salomones, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS.

Ubicación del experimento

El presente proyecto se realizó en el laboratorio de Biotecnología 2 del Tecnológico Nacional de México, campus Úrsulo Galván, localizado en la carretera Cardel Chachalacas Km. 4.5 en Úrsulo Galván, Ver. Mpio. de Úrsulo Galván. Las coordenadas 19°24'42" latitud norte y 96°21'30" longitud oeste. Descripción Climática. De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García (1981) en el Municipio de Úrsulo Galván predomina el clima cálido subhúmedo (Aw2) con lluvias en verano. La temperatura media anual fluctúa entre 22 y 24°C Con máximas de 35°C en los meses más calurosos y mínimas de 16°C en los meses invernales, la humedad relativa esta entre 70 y 80% y se encuentra ubicado a 8 msnm (De la fuente et al., 2004).

Los materiales empleados en este estudio fueron: Tambo de 200 Lts, Canastilla de hierro, Anaqueles con 4 niveles, Costales de arpilla, Equipo de protección (cofia, cubre bocas, bata), 1 Quemador de gas, Cinta canela, Papel pega moscas, Equipo de limpieza (jabón, cepillo, jalador, escoba, cloro), Machetes, Bolsas de polietileno 25 * 20, Hule negro. Equipos: Básculas, Molino, Estufa de secado, Mortero, Tubo de ensayo. Materia prima: Rastrojo de maíz, Olote picado, Paja de cebada, 10 kilos de micelio de hongo *Pleurotus djamor*, colocándose 150 gr por bolsa. Se empleó un diseño completamente al azar 4 X 25. Se utilizaron bolsas de polietileno de 40 x 60 cm con un peso de 5 Kg de sustrato húmedo. Los tratamientos utilizados fueron: T1 Rastrojo de maíz y cebada, T2 Rastrojo de maíz y olote, T3 Rastrojo de frijol y cebada, T4 Rastrojo de frijol y rastrojo de maíz. La variable medida fue: Días a la aparición de primordios. La toma de datos se llevó a cabo con registro anotándose la fecha de siembra y se contaron los días de incubación y posteriormente los días que aparecieron los primeros primordios de cada sustrato y también se contó el número de primordios de cada sustrato 3 veces al día.

La siembra se realizó en estratos, una capa de sustrato y un poco de micelio de hongo como se observa en las figuras 1 y 2 hasta que la bolsa tenga un peso aproximado de 5 kilos, la bolsa con sustrato debe de quedar lo más compactas posibles, la cantidad de semilla total que se deposita en la bolsa es de 150 gramos.



Fig.1 y 2 Siembra de sustratos con micelio de *P. djamour*. (Alarcón Acosta 2019)

Después de la siembra se esperan alrededor de 12, 24 o 48 horas donde se realizará el picado de las bolsas con un cuchillo y con una dilución de 50ml de agua y 50ml de cloro se procederá a picar para permitir que salgan los gases generados como el bióxido de carbono, producto de la actividad bioquímica que se ha iniciado con el micelio incubándose. hacer orificios a la bolsa es un detalle muy sencillo pero importante ya que, de no hacerse, el cultivo moriría irremediablemente los orificios no deben ser muy grandes porque se corre el riesgo de que se contamine el cultivo, pero tampoco deben ser muy pequeños porque es por esos orificios que se desechan los gases generados figuras 3 y 4.



Fig.3 y 4 Picado de bolsa (Alarcón Acosta 2019)

Las bolsas que fueron picadas y puestas en los anaqueles, se cubrieron con un hule negro ya que el micelio crece en oscuridad, una vez que el micelio cubrió el sustrato aparecieron los primeros primordios los cuales proseguimos a tomar los registros de su crecimiento de ser necesario se contaron durante 3 días ya que después de contar al día aparecían más en una bolsa en total pude dar más de 1000 primordios eso dependiendo el tipo de sustrato con el cual se haya implementado en la siembra en este caso mis sustratos fueron maíz, cebada y frijol, Fig.7 y 8.



Fig.7 y 8 Incubación de sustrato (Alarcón Acosta 2019)

Riego El riego se realizó diariamente con agua corriente de la llave, para el desarrollo y estimulación de los primordios y carpóforos, Figura 9.



Fig.9 Riego de sustrato (Alarcón Acosta 2019)

Conteo de primordios

En la toma de datos de esta variable se llevó a cabo un registro donde se anotó la fecha de siembra y se contaron los días de incubación y posteriormente los días que aparecieron los primeros primordios de cada sustrato y también se contó el número de primordios de cada sustrato 3 veces al día.



Fig.9 Conteo de primordios (Alarcón Acosta 2019)

RESULTADOS

Los tratamientos (T1) rastrojo de maíz y cebada (T2) rastrojo de olote y cebada (T3) rastrojo de frijol y cebada (T4) rastrojo de frijol y rastrojo de maíz donde fue necesario el uso del programa ANOVA

Variable aparición de primordios fecha 07/Nov/19

R-Cuadrado	Coef. Var.	Raiz MSE	Primera Media (Alt prim)
0.483101	28.46303	11.65650	40.95313

Anova y prueba de tukey.

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	2485.921875	828.640625	6.10	0.0014
Repeticón	15	3228.609375	215.240625	1.58	0.1170

Nº	Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamiento
1	A	47.250	16	1
	A			
	A	47.000	16	2
	B	36.000	16	4
	B			
	B	33.563	16	3



Grafica. 1 Variable días a la aparición de primordios (Alarcón Acosta)

CONCLUSIONES

El tratamiento sobresaliente a la variable días a la aparición de primordios fue Tratamiento 3 Mezcla de Rastrojo de frijol y cebada con una media 33.563 días, por lo tanto, se recomienda dicha composición en un 50% entre uno y otro bajo las condiciones que presento dicho estudio; lo cual hace que se pueda recomendar como un sustrato rentable y eficiente para el cultivo de este hongo, ya que se observa que presenta una buena eficiencia biológica.

Puesto que el periodo en que se realizo dicho estudio fue bajo condiciones de temperaturas frescas muy similares a las que se reportan para *Pleurotus ostreatus* según (Montalvo Macuixtle, 2016), ya que *Pleurotus djamour* bajo condiciones de temperaturas mas cálidas cambia la eficiencia biológica.

REFERENCIAS

- Dulce Salmenes. (2017). *Pleurotus djamor*, un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico. SCIELO, 1, 0.
- De la fuente, J. R., Del Val Blanco, E., Martucelli Quinata, J., Islas López, J., Narro Robles, J., & Drucker Colin, R. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Academia. <https://www.academia.edu/>
- Graciela Huerta. (2009). Grupos de interesterilidad y productividad de cepas de *Pleurotus* de regiones tropicales y subtropicales de México. 11 de enero del 2021, de scielo Sitio web: <http://www.scielo.org.mx/>

- Juan Alzueta. (2018). Las setas y sus características. 15 de diciembre del 2020, de Blog de promoción de la salud Sitio web: <http://www.sspa.juntadeandalucia.es/>
- Landa Peralta, E. (2008). Aislamiento de Esteróles a partir del Hongo Comestible *Pleurotus djamo*r. *djamor* (Maestría). universidad veracruzana.
- Magdalena Paz. (2017). "Productividad y actividad antioxidante de cepas silvestres, reconstituidas e híbridas de *Pleurotus djamo*r". 2017, de UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
- Mata, G., Salmones, D., & Savoie, J. M. (2017). las enzimas lignocelulolíticas de *pleurotus* spp. (licenciatura). I colegio de la frontera sur.
- Montalvo Macuixtle, D. L. (2016). aprovechamiento de esquilmos agrícolas para la producción de hongo comestible (*pleurotus ostreatus*) en la escuela secundaria técnica agropecuaria núm. 126 en Tehuipango, Veracruz. (Licenciatura). Tecnológico Nacional de México, Campus Úrsulo Galván.

MODELO DE INTERVENCIÓN SOCIAL: CAPACITACIÓN EN CULTIVO DE HONGO COMESTIBLE *Pleurotus ostreatus*. CASO: EL CRUCERO MUNICIPIO DE PUENTE NACIONAL, VER. MÉXICO

Ramiro Sánchez Uranga¹
 Juana Fabiola Jiménez Flores²
 Daniel Utrera López³
 Monserrat Acosta Cadenas⁴
 Héctor Gabriel Medina Lagunes⁵

RESUMEN

La transferencia de tecnología en la producción de hongos comestibles constituye una estrategia orientada a facilitar la adopción de prácticas innovadoras en comunidades rurales. El modelo de intervención social se fundamenta en la organización de las familias mediante la conformación de cooperativas de producción y consumo (Sánchez, 2025). En su fase inicial, la organización se establece a través de un grupo de trabajo; conforme la empresa alcanza mayor madurez, se transita hacia otras figuras asociativas. Este proceso se complementa con acciones de capacitación, asesoría y consultoría en la elaboración de planes de negocio y en la comercialización, incluyendo la incorporación de valor agregado.

La intervención se realizó con la participación de las autoridades municipales de Puente Nacional, Veracruz, México, seleccionándose la comunidad de El Crucero como espacio de aplicación. Se emitió una convocatoria abierta que permitió integrar a hombres y mujeres de la localidad.

En seguimiento a la propuesta de intervención social, se impartió el curso de cultivo de hongos comestibles del 30 de marzo al 3 de abril de 2026. Durante el taller se transfirió la tecnología necesaria para la producción en bolsas y cubetas, logrando que los participantes comprendieran el proceso y verificaran las ventajas de la producción de hongos comestibles.

Este enfoque favoreció la colaboración y el cooperativismo, contribuyendo al bienestar social de los participantes. La producción y el consumo obtenidos no solo satisfacen necesidades alimenticias, sino que también motivan a la organización comunitaria a producir para el autoconsumo y para el mercado. De esta manera, se impulsa la economía local y se promueve la cohesión social, generando un impacto positivo en el desarrollo rural sustentable.

Palabras claves: Intervención, hongos, producción.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. ramiro.su@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Juana.jf@ugalvan.tecnm.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. daniel.ul@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. monserrat.ac@ugalvan.tecnm.mx

⁵ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. hector.ml@ugalvan.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

El cultivo de hongos comestibles representa una alternativa viable para fortalecer la seguridad alimentaria y mejorar la economía de las familias tanto en comunidades rurales como en ámbitos urbanos. Esta propuesta tiene como finalidad transferir conocimientos técnicos y promover la producción y el consumo de hongos en espacios familiares, rurales, urbanos y suburbanos. Asimismo, busca fomentar la organización social mediante esquemas de economía social y solidaria orientados a dichos fines.

El Tecnológico Nacional de México, a través de la Dirección de Posgrado e Investigación, constituyó la Red Nacional de Producción e Investigación de Recursos Fúngicos, con la participación de diversos campus ubicados en el territorio nacional. En particular, el Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, localizado en el municipio homónimo del estado de Veracruz, posee una amplia trayectoria en el desarrollo de investigación y producción de distintas especies de hongos, que abarcan desde hongos fitopatógenos hasta comestibles, como los géneros *Pleurotus* y *Ustilago maydis* (huitlacoche), entre otros.

En este contexto, se inicia una nueva etapa en la producción e investigación de hongos comestibles del género *Pleurotus*. La experiencia acumulada y el conocimiento generado permiten escalar los esfuerzos hacia la participación social, mediante la transferencia de conocimiento y tecnología, con el propósito de consolidar procesos productivos sustentables y de impacto comunitario.

OBJETIVOS

Objetivo general: Fomentar la capacitación para la producción y consumo de hongos comestibles en las familias en el ámbito rural, urbano y suburbano a través del desarrollo de capacidades y promoción del emprendimiento.

Objetivos específicos:

Capacitar a las familias sobre técnicas de cultivos de hongos comestibles género *Pleurotus*. En la comunidad El Crucero municipio de Puente Nacional, Ver. México.

Promover el valor nutricional y las capacidades culinarias de los hongos, género *Pleurotus*.

Establecer un modelo de negocio sostenible para la venta de hongos comestibles género *Pleurotus*.

Impulsar la organización social mediante esquemas de economía social y solidaria, a través de la constitución de cooperativas de producción y consumo.

MARCO TEORICO.

Hongos comestibles: aspectos técnicos.

Biología de los hongos: estructura, reproducción y ciclos de vida.

El género *Pleurotus*, comúnmente conocido como “seta ostra”, comprende una amplia variedad de hongos comestibles que destacan tanto por su sabor como por su valor nutricional. Este grupo es ampliamente cultivado y utilizado en la gastronomía de diversas culturas, además de constituir una alternativa sustentable para la producción alimentaria.

Estructura

Basidiocarpos: Los hongos del género *Pleurotus* presentan un sombrero con morfología característica, generalmente en forma de abanico o concha. Su color varía desde el blanco hasta tonalidades grisáceas y marrones. El tamaño del sombrero depende de la especie y de las condiciones de cultivo.

Branquias: Localizadas en la parte inferior del sombrero, son responsables de la producción de esporas. En *Pleurotus*, las branquias son descendentes, es decir, se extienden más allá del borde del sombrero hacia el tallo.

Tallo: Por lo general es corto y lateral, lo que favorece una mayor exposición del basidiocarpo al sustrato nutritivo.

Micelio: Constituye el cuerpo vegetativo del hongo y está formado por hifas (filamentos). Su función principal es descomponer la materia orgánica y absorber nutrientes, desempeñando un papel esencial en los ciclos biogeoquímicos.

Reproducción en *Pleurotus*

La reproducción en los hongos del género *Pleurotus* puede ocurrir tanto de manera asexual como sexual, dependiendo de las condiciones ambientales y de la compatibilidad genética de las hifas.

Reproducción asexual: Se lleva a cabo mediante la formación de esporas, específicamente basidiosporas, que se desarrollan en las branquias del basidiocarpo. Estas esporas, una vez liberadas, se dispersan en el ambiente y, bajo condiciones favorables, germinan para originar nuevos micelios.

Reproducción sexual: Se produce cuando dos hifas compatibles se fusionan, dando lugar a la formación de estructuras especializadas que permiten la recombinación genética. Este proceso culmina en la generación de un nuevo basidiocarpo, el cual asegura la continuidad del ciclo de vida y la diversidad genética de la especie.

Ciclo de vida de *Pleurotus*

El ciclo de vida de los hongos del género *Pleurotus* puede describirse en varias etapas fundamentales:

Germinación: Las esporas, al encontrar un ambiente adecuado en términos de humedad, temperatura y disponibilidad de nutrientes, germinan y originan hifas.

Desarrollo del micelio: Las hifas se entrelazan formando un micelio, que coloniza el sustrato y descompone la materia orgánica para absorber nutrientes.

Fructificación: Bajo condiciones ambientales óptimas —como humedad relativa elevada, temperatura moderada y presencia de luz difusa— el micelio produce cuerpos fructíferos (setas).

Producción de esporas: Los basidiocarpos maduran y desarrollan esporas en las branquias. Una vez alcanzada la madurez, las esporas son liberadas al medio ambiente.

Ciclo de renovación: Las esporas depositadas sobre un sustrato adecuado reinician el ciclo, asegurando la continuidad de la especie y su capacidad de adaptación a distintos ambientes.

Beneficios de los hongos *Pleurotus* en la dieta

Los hongos del género *Pleurotus*, comúnmente conocidos como setas ostra, han sido ampliamente estudiados por sus múltiples beneficios nutricionales y para la salud. A continuación, se destacan los aspectos más relevantes relacionados con su aporte de proteínas, vitaminas y minerales en la dieta humana.

Proteínas: Los hongos *Pleurotus* constituyen una excelente fuente de proteínas de alta calidad, al contener todos los aminoácidos esenciales. Esto los convierte en un sustituto atractivo de la carne, especialmente para vegetarianos y veganos. Se ha reportado que las setas ostra contienen entre un 20 y 30% de proteínas en su composición seca (Oei, 1996).

Vitaminas: Son particularmente ricos en vitaminas del grupo B, incluyendo riboflavina (B2), niacina (B3) y ácido pantoténico (B5). Estas vitaminas desempeñan funciones esenciales en el metabolismo energético, la salud del sistema nervioso y la producción de glóbulos rojos (Zhang, 2016). Además, *Pleurotus* puede aportar vitamina D cuando se expone a la luz solar o a radiación UV, contribuyendo al mantenimiento de niveles adecuados en individuos con baja ingesta dietética (Muro et al., 2018).

Minerales: Estos hongos son una fuente importante de potasio, fósforo, zinc y selenio. El potasio es fundamental para la regulación de la presión arterial, mientras que el zinc y el selenio cumplen funciones clave en el sistema inmunológico y en la actividad celular (Cuadra et al., 2020).

Propiedades funcionales: Además de su valor nutricional, los hongos *Pleurotus* han demostrado poseer propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Dichos efectos pueden contribuir a la prevención de enfermedades crónicas, incluyendo afecciones cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Zhang et al., 2018).

En síntesis, incorporar hongos *Pleurotus* en la dieta no solo proporciona un perfil nutricional sobresaliente, sino que también ofrece beneficios adicionales para la salud. Su capacidad de actuar como fuente de proteínas, vitaminas y minerales los convierte en un alimento funcional de gran valor.

MARCO CONTEXTUAL.

El proyecto se desarrolló en el municipio de Puente Nacional, ubicado entre los paralelos 19°11' y 19°26' N y los meridianos 96°22' y 96°49' O. El municipio cuenta con una superficie de 133 km², equivalente al 0.46% del territorio estatal, y una altitud promedio de 105 m sobre el nivel del mar. Su clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 20–26 °C y

una precipitación de 900–1600 mm. La población estimada en 2024 es de 23,544 habitantes, cuya cabecera municipal es Puente Nacional.

La principal actividad económica corresponde a la agricultura (caña de azúcar, chile serrano y papaya maradol) y la ganadería. En cuanto a su hidrografía, el municipio está atravesado por el río Los Pescados (Huitzilapan), afluente del río La Antigua. La infraestructura educativa está conformada por 72 instituciones: 26 de nivel preescolar, 29 de primaria, 13 de secundaria y 3 de nivel medio superior. Por otra parte, la comunidad de El Crucero fue seleccionada como espacio de intervención. Esta congregación se localiza a 4 km al oeste-suroeste de la cabecera municipal, en las coordenadas 19°19'07" N y 96°31'27" O, con una altitud de 189–190 m sobre el nivel del mar. Su población estimada es de 563 habitantes, cuyo gentilicio es crucereño. Cabe señalar que, mediante decreto del 25 de octubre de 1892, El Crucero fue designado originalmente como cabecera municipal, aunque posteriormente dicha función se trasladó a Puente Nacional. Actualmente, el acceso a la comunidad se realiza por carretera pavimentada.

PROCEDIMIENTOS

Una vez realizadas las gestiones pertinentes, se convocó a los habitantes de la comunidad de El Crucero. Al curso de producción asistieron 30 pobladores: 6 mujeres y 24 hombres. La edad de los participantes osciló entre los 31 y los 94 años, con un promedio de 63.8 años.

Capacitación

Posteriormente, los participantes realizaron una visita al Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, donde recorrieron el laboratorio de biotecnología y el área de producción de hongos. Durante la visita, recibieron una conferencia impartida por el Prof. Daniel Utrera López y la Profa. J. Fabiola Jiménez Flores, con el apoyo del Ing. Héctor Escobar Molina y personal técnico.

En esta sesión se acordaron los términos para llevar a cabo la capacitación en la comunidad, con el objetivo de transferir conocimientos y habilidades para la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus*.

Monitoreo del proceso

El seguimiento del proyecto se realizará mediante indicadores de éxito que permitan evaluar su impacto en la comunidad. Los principales indicadores considerados son:

Número de familias capacitadas.

Módulos de producción implementados.

Volumen de producción y ventas.

Volumen destinado al consumo familiar.

Estos indicadores se reflejarán en la siguiente fase del modelo de intervención social, permitiendo medir la efectividad de las acciones implementadas.

SOSTENIBILIDAD DEL PROYECTO

La sostenibilidad se garantizará mediante la creación de una red de apoyo entre las familias productoras, con el propósito de favorecer el intercambio de experiencias, recursos y buenas prácticas. Este mecanismo se extenderá hacia otras comunidades que participen en el proyecto, fortaleciendo la economía social y solidaria.

RETROALIMENTACIÓN

La evaluación del impacto se llevará a cabo mediante encuestas y entrevistas aplicadas a los participantes, una vez que el módulo de producción de hongos esté establecido y en funcionamiento. Los resultados permitirán medir el nivel de satisfacción y el efecto del proyecto en la comunidad, además de proporcionar insumos para ajustar las estrategias en fases posteriores.

RESULTADOS

Se llevó a cabo el curso de capacitación para la producción de hongos comestibles, basado en el manual técnico y en la experiencia de los instructores. Los miembros de la comunidad acordaron realizarlo en las instalaciones de la Casa del Campesino, aportando los insumos necesarios: pacas de trigo, tambores de plástico para el proceso, tambores metálicos para la pasteurización, así como canastillas y carretillas para el manejo del material.

PROCEDIMIENTO GENERAL

Plática introductoria: Se ofreció una explicación previa sobre la producción de hongos, verificando la disponibilidad de materiales y entregando artículos para garantizar la inocuidad (cubrebocas, gel desinfectante, entre otros).

Hidratación de la paja: La paja se sumergió en agua durante al menos 30 minutos para su hidratación.

Pasteurización: Se utilizaron tanques metálicos como contenedores, empleando leña como fuente de calor. La paja hidratada se colocó en canastillas y se introdujo en los tambores de lámina, permaneciendo entre 2 y 3 horas.

Siembra: Una vez pasteurizada, la paja se trasladó a las mesas de trabajo para iniciar el proceso de inoculación. La siembra se realizó en bolsas de plástico y en cubetas de 19 litros. Cada participante sembró en ambos formatos.

Incubación: Las bolsas inoculadas se colocaron en el área destinada a la incubación, mientras que las cubetas se apilaron en forma vertical para favorecer la micelación.

Seguimiento: Durante la semana y en días posteriores se revisaron las unidades de producción. En el caso de las bolsas, se retiró la cubierta plástica para permitir la propagación del hongo; en las cubetas se verificó el crecimiento del micelio.

Este proceso permitió a los participantes adquirir experiencia práctica en todas las fases de la producción de hongos *Pleurotus*, desde la preparación del sustrato hasta la incubación y seguimiento del crecimiento.

Una vez obtenida la primera producción de hongos, los participantes los destinaron al autoconsumo, manifestando que la experiencia fue adecuada y enriquecedora. Asimismo, expresaron su disposición para organizarse con el fin de instalar un módulo de producción comunitario, lo que representa un avance hacia la sostenibilidad del proyecto y la consolidación de la economía social en la comunidad.

La comunidad manifestó interés en instalar un módulo de producción.

Se discutió la viabilidad de un espacio comunitario

Se planteó la creación de un módulo permanente

Se acordó continuar con la capacitación y seguimiento

Este resultado refleja no solo la apropiación tecnológica por parte de la comunidad, sino también la motivación para avanzar hacia un modelo de producción organizado y sostenible.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La actividad de capacitación, promoción y motivación para la producción de hongos comestibles permitió que los participantes adquirieran conocimientos técnicos y prácticos, además de generar interés en la organización comunitaria. Como resultado, los asistentes acordaron reunirse para conformar un grupo de trabajo con el propósito de instalar un módulo de producción, comprometiéndose a realizar las gestiones necesarias durante el resto del año.

Se recomienda dar seguimiento al grupo para que, en la siguiente fase del modelo de intervención social, se conforme una figura legal que respalde la producción. En esta etapa inicial, resulta conveniente que los participantes se organicen como grupo de trabajo; posteriormente, conforme el grupo madure y se obtengan resultados positivos del módulo de producción, se podrá formalizar una figura organizativa con reconocimiento legal.

Asimismo, se recomienda iniciar un proceso de capacitación complementaria orientado a la elaboración de un plan de negocios y a la estrategia de comercialización, lo que permitirá garantizar la sostenibilidad económica del proyecto y fortalecer la economía social y solidaria en la comunidad.

ANEXOS:



Fig. 1. Preparación del sustrato.



Fig. 2. Proceso de pasteurización.



Fig. 3. Recepción en mesas de trabajo.



Fig. 4. Preparación de sustrato para la siembra.



Fig. 5. Siembra en bolsa.



Fig. 6. Siembra en cubeta.



Fig. 7. Mazacotes micelados.



Fig. 8. Producción o fructificación.

REFERENCIAS

- Álvarez, L. C., & Pérez, J. (2018). "El efecto del sustrato en el cultivo de especies de *Pleurotus*: Una revisión". *Journal of Fungi*, 4(3), 88.
- Cuadra, S., Pineda, J., & García, R. (2020). Análisis de nutrientes y minerales en setas comestibles. *Revista de Nutrición y Salud*, 10(3), 205-212.
- Cruz, M. J., & Ochoa, C. (2020). Hongos comestibles: su importancia nutricional y culinaria. Editorial Universitaria.
- Chang, S. T., & Miles, P. G. (2004). *Biología de los Hongos: Conceptos Básicos y Técnicas*. World Scientific Publishing.
- Muro, S., Aráuz, M., & Rojas, F. (2018). La vitamina D en setas del género *Pleurotus*: un estudio de su enriquecimiento. *Revista de Microbiología Alimentaria*, 14(1), 45-52.
- Oei, P. (1996). *Cultivo de hongos: un manual práctico*. Bogotá: Ediciones de la U. Fernández, J. (2019). *Hongos comestibles: variedades y beneficios*. Ediciones del Campo.
- Guzmán, G., & Rodríguez, V. (2021). Cultivo y uso de hongos comestibles en la cocina moderna. *Revista de Gastronomía y Nutrición*, 15(3), 45-60.
- Royse, D. J. (2014). "Cultivo de Hongos en el siglo XXI". *Mushroom Science*.
- Sánchez, U, R. (2025). *Modelo de intervención social: Plan estratégicos para la producción y comercialización del cultivo de hongo comestible género: *Pleurotus**
ISBN: 978-607-5893-54-9 RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI).
- Zhang, Z. (2016). Nutrientes en hongos comestibles: implicaciones en la salud humana. *Revista Internacional de Nutrición y Metabolismo*, 5(4), 121-128.
- Zhang, Y., Liu, X., & Wang, Y. (2018). Propiedades antioxidantes de hongos del género *Pleurotus* y su potencial en la prevención de enfermedades crónicas. *Journal of Medicinal Mushrooms*, 25(6), 78-86.

EVALUACIÓN DEL DESARROLLO MORFOLÓGICO DE TRES GENOTIPOS DE PITAHAYA (*Selenicereus undatus*)

Héctor Gabriel Medina Lagunes¹

Erick Palmeros Rodríguez²

Ramiro Sánchez Uranga³

Juana Fabiola Jiménez Flores⁴

Daniel Utrera López⁵

Montserrat Acosta Cadenas⁶

RESUMEN

La pitahaya (*Selenicereus undatus*) constituye una alternativa productiva de creciente importancia en regiones tropicales y subtropicales debido a su valor comercial, adaptabilidad agroecológica y potencial nutricional. El objetivo del presente estudio fue analizar y comparar el desarrollo morfológico de tres genotipos de pitahaya bajo condiciones homogéneas de cultivo, con la finalidad de identificar diferencias asociadas con su potencial agronómico.

La investigación se desarrolló mediante un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones y cinco plantas por unidad experimental. Se evaluaron variables relacionadas con el crecimiento vegetativo, incluyendo número de brotes por planta, longitud de brotes y grosor de cladodios durante un periodo de 120 días.

Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre genotipos. El Genotipo A presentó el mayor número de brotes por planta (3.8), el Genotipo C mostró la mayor longitud promedio de brotes (21.4 cm) y el Genotipo B registró el mayor grosor de cladodios (2.8 cm). Estas diferencias reflejan estrategias de crecimiento diferenciadas que pueden ser aprovechadas para fines productivos específicos.

Los hallazgos permiten identificar materiales con características favorables para programas de selección genética, manejo agronómico especializado y establecimiento de nuevas plantaciones de pitahaya en regiones tropicales de México.

Palabras clave: pitahaya, genotipos, desarrollo morfológico, crecimiento vegetativo, caracterización agronómica.

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. hector.ml@ugalvan.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván.

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. ramiro.su@ugalvan.tecnm.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Juana.jf@ugalvan.tecnm.mx

⁵ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. daniel.ul@ugalvan.tecnm.mx

⁶ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. monserrat.ac@ugalvan.tecnm.mx

INTRODUCCIÓN

La pitahaya (*Selenicereus undatus*), conocida comúnmente como fruta del dragón, ha experimentado un importante crecimiento en su demanda debido a sus características nutraceuticas, calidad organoléptica y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales. Su cultivo representa una alternativa viable para la diversificación agrícola en regiones tropicales y subtropicales, especialmente bajo escenarios de cambio climático y limitaciones hídricas.

A pesar del creciente interés comercial, aún existe información limitada sobre el comportamiento agronómico de diferentes genotipos cultivados en México. La caracterización morfológica constituye una herramienta fundamental para identificar materiales genéticos con mejor adaptación, vigor vegetativo y potencial productivo.

Diversos autores señalan que variables como número de brotes, longitud de cladodios, diámetro de tallos y arquitectura vegetal permiten establecer diferencias significativas entre materiales genéticos, facilitando procesos de selección y mejoramiento vegetal. En este contexto, el presente estudio tuvo como propósito evaluar el desarrollo morfológico de tres genotipos de pitahaya cultivados bajo condiciones homogéneas, generando información útil para productores, investigadores y programas de mejoramiento genético.

CONTENIDO, MATERIAL Y MÉTODOS

La pitahaya (*Selenicereus undatus*) es una especie perteneciente a la familia Cactaceae que en los últimos años ha despertado un creciente interés entre productores, investigadores y organismos de desarrollo rural debido a su elevada adaptación a condiciones climáticas adversas, así como por el incremento sostenido de la demanda de sus frutos en mercados nacionales e internacionales. La identificación de materiales genéticos con características agronómicas sobresalientes constituye una de las principales líneas de investigación orientadas al fortalecimiento de la productividad y sostenibilidad de este cultivo.

La caracterización morfológica representa una herramienta ampliamente utilizada para la diferenciación de genotipos vegetales, permitiendo identificar atributos relacionados con el crecimiento, vigor, adaptación y potencial productivo. En especies perennes como la pitahaya, las características morfológicas observadas durante las etapas iniciales del establecimiento pueden constituir indicadores confiables del comportamiento agronómico futuro de los materiales evaluados.

De acuerdo con Esquivel-Fernández y Araya-Vargas (2018), las evaluaciones morfológicas permiten establecer criterios objetivos para la selección de materiales vegetales, mientras que Siviero et al. (2015) señalan que variables como longitud de cladodios, número de brotes y diámetro de tallos presentan una estrecha relación con el vigor vegetativo y la productividad potencial del cultivo. Bajo

esta perspectiva, la evaluación comparativa de genotipos constituye una estrategia fundamental para programas de mejoramiento genético y conservación de recursos fitogenéticos.

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental, orientado a la evaluación comparativa del desarrollo morfológico de tres genotipos comerciales de pitahaya. El estudio se realizó en el área experimental localizada en las inmediaciones del Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico Nacional de México Campus Úrsulo Galván, Veracruz, México. El sitio experimental se caracteriza por presentar condiciones climáticas tropicales subhúmedas, con temperatura media anual cercana a los 25 °C y precipitación promedio superior a los 1,200 mm anuales, condiciones favorables para el establecimiento y desarrollo de especies cactáceas tropicales. Previo al establecimiento del experimento se realizó la limpieza manual del terreno, eliminando malezas y residuos vegetales que pudieran interferir con el desarrollo de las plantas. Posteriormente se efectuó el trazado de surcos considerando una separación de 2 m entre hileras y 0.5 m entre plantas, buscando proporcionar suficiente espacio para el crecimiento vegetativo y facilitar las labores de manejo agronómico.

Los materiales vegetales utilizados correspondieron a tres genotipos de pitahaya identificados de acuerdo con las características de sus frutos:

- Genotipo A: Pitahaya de cáscara roja y pulpa roja.
- Genotipo B: Pitahaya de cáscara roja y pulpa blanca.
- Genotipo C: Pitahaya de cáscara amarilla y pulpa blanca.

Para garantizar la uniformidad experimental, los esquejes seleccionados presentaron una longitud aproximada de 30 cm y condiciones fitosanitarias adecuadas. Antes de la siembra, el material vegetal fue sometido a un proceso de desinfección mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 5 %, con la finalidad de reducir riesgos asociados a la presencia de microorganismos patógenos.

La plantación se estableció utilizando un sistema de tutorado vertical, método ampliamente empleado en la producción comercial de pitahaya debido a que favorece la distribución de la luz, mejora la ventilación de la planta y facilita las labores de poda, conducción y cosecha. Asimismo, se instaló un sistema de riego por goteo para mantener condiciones de humedad relativamente homogéneas durante todo el periodo experimental.

El diseño experimental empleado fue un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), constituido por tres tratamientos correspondientes a los genotipos evaluados. Cada tratamiento estuvo integrado por tres repeticiones y cinco plantas por unidad experimental, obteniéndose un total de cuarenta y cinco plantas bajo evaluación.

El periodo de observación comprendió 120 días posteriores al establecimiento de los esquejes. Durante este tiempo se realizaron evaluaciones periódicas cada ocho días, permitiendo documentar la dinámica de crecimiento vegetativo de los diferentes materiales genéticos.

Las variables morfológicas evaluadas fueron seleccionadas considerando su importancia agronómica y su relación con el vigor vegetativo de la especie:

Número de brotes por planta. Esta variable se determinó mediante conteo directo de los brotes emitidos por cada planta durante el periodo de evaluación. El número de brotes constituye un indicador de la capacidad de regeneración y expansión vegetativa de los genotipos.

Longitud de brotes. Se registró utilizando una regla métrica graduada en centímetros, midiendo desde la base hasta el ápice de cada brote desarrollado. Esta variable refleja la velocidad de crecimiento y elongación vegetativa.

Diámetro o grosor de cladodios. Fue determinado mediante un vernier digital calibrado, registrando el grosor promedio de los brotes principales. Esta característica se relaciona con la capacidad de almacenamiento de agua y reservas nutritivas de la planta.

Adicionalmente, se realizaron observaciones cualitativas relacionadas con el vigor general de las plantas, uniformidad de crecimiento, respuesta al manejo agronómico y adaptación a las condiciones ambientales presentes durante el desarrollo del experimento.

La información obtenida en campo fue registrada en formatos estandarizados diseñados para garantizar la consistencia de los datos. Posteriormente, la información fue capturada y organizada en hojas de cálculo electrónicas para facilitar su procesamiento estadístico.

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando los programas Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) y RStudio. Inicialmente se efectuó estadística descriptiva mediante el cálculo de medias, desviaciones estándar y coeficientes de variación para cada variable evaluada. Posteriormente se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre los genotipos.

Cuando se detectaron diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (HSD), permitiendo identificar cuáles genotipos presentaban comportamientos diferenciados para las variables analizadas. Asimismo, se generaron representaciones gráficas mediante diagramas de cajas y gráficos de dispersión para facilitar la interpretación visual de los resultados obtenidos.

La metodología empleada permitió evaluar de manera objetiva y sistemática el comportamiento morfológico de los tres genotipos de pitahaya, proporcionando información relevante para futuras investigaciones relacionadas con selección genética, propagación vegetal y manejo agronómico de esta especie de importancia económica creciente.

RESULTADOS

El desarrollo morfológico de la pitahaya (*Selenicereus undatus*) constituye uno de los principales indicadores del comportamiento agronómico de los materiales genéticos durante las etapas iniciales de establecimiento. Las características vegetativas observadas durante este periodo permiten identificar diferencias en el potencial de crecimiento, adaptación y aprovechamiento de recursos entre genotipos, proporcionando información valiosa para procesos de selección y mejoramiento genético. Durante los 120 días de evaluación, los tres genotipos mostraron una adecuada adaptación a las condiciones ambientales del sitio experimental, observándose supervivencias superiores al 90 % en todas las unidades experimentales. No obstante, las tasas de crecimiento y la expresión de las variables morfológicas evaluadas evidenciaron diferencias importantes entre materiales, lo que permitió identificar patrones específicos de desarrollo vegetativo.

Los resultados obtenidos indican que la respuesta de los genotipos estuvo influenciada principalmente por factores genéticos, debido a que todas las plantas fueron establecidas bajo las mismas condiciones de suelo, riego, manejo agronómico y exposición ambiental. Esta condición experimental permitió atribuir las diferencias observadas principalmente a la variabilidad genética existente entre los materiales evaluados.

Número de brotes por planta

La emisión de brotes constituye uno de los principales indicadores de vigor vegetativo en especies cactáceas, ya que refleja la capacidad de crecimiento, regeneración y formación de estructuras potencialmente productivas. Durante el periodo experimental se registraron diferencias significativas entre los genotipos evaluados.

El Genotipo A presentó el mayor promedio de brotes por planta, alcanzando 3.8 brotes, mientras que los Genotipos B y C registraron promedios de 2.4 y 1.9 brotes por planta, respectivamente.

Genotipo	Número promedio de brotes/planta
A	3.8
B	2.4
C	1.9

Los resultados del análisis de varianza mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$), indicando que el comportamiento observado difícilmente puede atribuirse al azar.

La elevada capacidad de brotación observada en el Genotipo A sugiere una mayor actividad meristemática y una rápida capacidad de respuesta fisiológica después del trasplante. Este comportamiento puede representar una ventaja importante en sistemas comerciales donde se busca acelerar el establecimiento del cultivo y aumentar el número de estructuras vegetativas disponibles para futuras etapas reproductivas.

Durante las primeras semanas de evaluación se observó que el Genotipo A inició la emisión de brotes aproximadamente entre 8 y 12 días antes que los otros materiales, situación que contribuyó a mantener una ventaja acumulativa durante todo el ciclo experimental.

Por otra parte, el Genotipo C mostró una emisión más lenta y gradual de brotes. Aunque esta característica podría interpretarse inicialmente como una limitación, diversos estudios han señalado que algunos genotipos presentan estrategias fisiológicas conservadoras orientadas a optimizar el uso de recursos disponibles, especialmente bajo condiciones de estrés ambiental.

Longitud promedio de los brotes

La longitud de los brotes representa un indicador importante del crecimiento vegetativo y de la capacidad de expansión estructural de la planta. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los materiales evaluados.

El Genotipo C presentó la mayor longitud promedio de brotes con 21.4 cm, seguido por el Genotipo B con 18.7 cm y el Genotipo A con 16.9 cm.

Genotipo	Longitud promedio de brotes (cm)
A	16.9
B	18.7
C	21.4

El análisis estadístico confirmó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), evidenciando patrones de crecimiento contrastantes.

A pesar de que el Genotipo A presentó la mayor cantidad de brotes, estos mostraron una longitud inferior respecto a los otros materiales. Este comportamiento sugiere la existencia de una relación fisiológica de compensación entre la emisión de nuevos brotes y la elongación individual de cada estructura vegetativa.

En contraste, el Genotipo C destinó una mayor proporción de sus recursos metabólicos al crecimiento longitudinal de los cladodios. Este patrón podría favorecer procesos de conducción, tutorado y propagación vegetativa, ya que la disponibilidad de cladodios más largos facilita la obtención de material para nuevas plantaciones.

Las observaciones realizadas durante el trabajo de campo mostraron que las plantas pertenecientes al Genotipo C desarrollaron una arquitectura más abierta y expansiva, permitiendo una mayor exploración del espacio aéreo disponible. Esta característica podría favorecer la captación de radiación solar y mejorar la eficiencia fotosintética bajo determinadas condiciones de cultivo.

Grosor de los brotes (diámetro de cladodios)

El diámetro de los cladodios constituye una característica estrechamente relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua, acumulación de reservas y resistencia estructural de la planta.

Los resultados obtenidos mostraron que el Genotipo B alcanzó el mayor grosor promedio con 2.8 cm, seguido por el Genotipo C con 2.5 cm y el Genotipo A con 2.2 cm.

Genotipo	Grosor promedio (cm)
A	2.2
B	2.8
C	2.5

Las diferencias observadas resultaron estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

La superioridad del Genotipo B en esta variable sugiere una mayor capacidad para almacenar agua y nutrientes dentro de los tejidos suculentos característicos de las cactáceas. Esta condición puede representar una ventaja importante en regiones sujetas a periodos de sequía o limitaciones en la disponibilidad hídrica.

Desde el punto de vista agronómico, los cladodios más gruesos suelen presentar una mayor resistencia mecánica frente a daños físicos, así como una mayor tolerancia frente a fluctuaciones ambientales extremas. Asimismo, la acumulación de reservas en los tejidos vegetativos puede favorecer procesos posteriores de floración y fructificación.

Durante las evaluaciones visuales se observó que las plantas del Genotipo B presentaron una apariencia más robusta y compacta, con tejidos de consistencia firme y elevada turgencia celular, características generalmente asociadas con un adecuado estado fisiológico.

Evaluación integral del vigor vegetativo

La integración de las variables analizadas permitió establecer una caracterización general del comportamiento agronómico de cada genotipo.

El Genotipo A destacó por presentar la mayor capacidad de emisión de brotes, evidenciando un crecimiento agresivo y una rápida ocupación del espacio disponible. Esta característica lo convierte en un material potencialmente adecuado para sistemas intensivos de producción donde se requiere una rápida formación de estructuras vegetativas.

El Genotipo B mostró un comportamiento equilibrado entre crecimiento y robustez estructural. Su mayor grosor de cladodios sugiere una elevada capacidad de adaptación a condiciones ambientales restrictivas y una posible ventaja en ambientes con estrés hídrico recurrente.

Por su parte, el Genotipo C sobresalió por la longitud de sus brotes, manifestando una estrategia de crecimiento orientada hacia la expansión vegetativa. Este comportamiento puede resultar favorable para programas de propagación, multiplicación y establecimiento de nuevas plantaciones.

De manera general, los resultados obtenidos evidencian la existencia de diferencias morfológicas importantes entre los tres genotipos evaluados. Estas variaciones representan una oportunidad para seleccionar materiales específicos de acuerdo con los objetivos productivos de cada sistema agrícola.

Los hallazgos obtenidos constituyen una base sólida para futuras investigaciones relacionadas con productividad, floración, rendimiento de fruto, calidad poscosecha, eficiencia fisiológica y adaptación a diferentes condiciones agroecológicas. Asimismo, contribuyen al fortalecimiento del conocimiento científico sobre la variabilidad genética existente en *Selenicereus undatus* y su potencial aprovechamiento dentro de sistemas agrícolas sostenibles.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que existe una variabilidad morfológica importante entre los genotipos evaluados de *Selenicereus undatus*, aun cuando fueron cultivados bajo condiciones ambientales similares.

El Genotipo A destacó por su elevado vigor vegetativo expresado mediante una mayor emisión de brotes. Esta característica puede representar una ventaja para sistemas de producción intensiva donde se requiere rápida cobertura y formación de estructuras productivas.

El Genotipo C mostró una mayor elongación de brotes, lo cual podría favorecer procesos de propagación y expansión vegetativa. Mientras tanto, el Genotipo B presentó mayor robustez estructural debido al incremento en el grosor de los cladodios, atributo relacionado con tolerancia al estrés hídrico y almacenamiento de recursos.

En términos generales, la evaluación morfológica permitió identificar características agronómicas diferenciadas que pueden ser utilizadas en programas de selección varietal y mejoramiento genético. Asimismo, los resultados sugieren la necesidad de realizar evaluaciones complementarias relacionadas con producción de frutos, calidad poscosecha, eficiencia fisiológica y adaptación a diferentes condiciones agroclimáticas.

REFERENCIAS

- Arévalo-Galarza, M. L., Ortíz-Hernández, Y. D., & Castillo-Martínez, C. R. (2007). Establecimiento y evaluación de genotipos de pitahaya en Morelos, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(2), 161–167.
- Esquivel-Fernández, L., & Araya-Vargas, J. (2018). Caracterización morfológica de pitahaya (*Hylocereus* spp.) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 511–526.
- González-Alatorre, G., Pérez-Márquez, M., & Ramírez-Arias, R. (2023). Evaluación agronómica y morfológica de cultivares de pitahaya en condiciones semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 553–567.
- Ortiz-Hernández, Y. D., & Carrillo-Salazar, J. A. (2012). La pitahaya (*Hylocereus* spp.): una opción para diversificar la producción agrícola. INIFAP.

- Reyes-Alemán, J. C., Báez-Sañudo, R., & González-Aguilar, G. (2017). Fenología y crecimiento de pitahaya bajo condiciones de cultivo en Nayarit. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1253–1265.
- Siviero, A., Lopes, J. C., & Silva, S. (2015). Morphoagronomic characterization and productivity of dragon fruit under organic management. *Scientia Horticulturae*, 192, 420–427.



RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS
DE INVESTIGACIÓN



ISBN: 978-607-5893-91-4

