



ENFOQUES

TRANSDISCIPLINARIOS:

CIENCIA Y SOCIEDAD

BIOINSUMOS PARA UNA AGRICULTURA SUSTENTABLE



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS







ENFOQUES TRANSDISCIPLINARIOS: CIENCIA Y SOCIEDAD, volumen 2, no. 2, julio – diciembre 2024, es una publicación digital semestral editada y difundida por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. Av. Normalistas 800, Colinas de La Normal, C. P. 44270, Guadalajara, Jal., Tel. (33)3345-5200 ext. 1418 y 2007. <https://www.revistaht.mx/>, revistaenfoques@ciatej.mx. Editores responsables: Dr. Luis Alfonso Mojica Contreras y Dr. Gustavo Adolfo Castillo Herrera. Reserva de derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-053011485500-102, ISSN 3061-709X, ambos otorgados por Instituto Nacional del Derecho de Autor. **Responsable de la última actualización de este número:** Departamento de Producción y cuidado editorial, Lic. José Enrique Rentería Méndez, Av. Normalistas 800, Colinas de La Normal, C. P. 44270, Guadalajara, Jal., fecha de última modificación, 1 de julio de 2024.



DIRECTORIO

DIRECTORA GENERAL DE LA REVISTA

Dra. Eugenia del Carmen Lugo Cervantes
elugo@ciatej.mx

EDITORES INVITADOS DE NÚMERO ESPECIAL

Dr. Gabriel Rincón Enríquez
grincon@ciatej.mx

Dr. Jhony Navat Enríquez Vara
jenriquez@ciatej.mx

EDITORES EN JEFE

Dr. Luis Alfonso Mojica Contreras
lmojica@ciatej.mx

Dr. Gustavo Adolfo Castillo Herrera
gcastillo@ciatej.mx

EDITORAS

Dra. Anne Christine Gschaedler Mathis
agschaedler@ciatej.mx

Dra. María de Lourdes Flores López
lflores@ciatej.mx

EDITOR EXTERNO

Dr. Ever Sánchez Osorio
esanchezos@conacyt.mx

EDITORES(AS) ASOCIADOS(AS)

INTERNOS(AS)

Tecnología Alimentaria

Dra. Judith Esmeralda Urias Silvas
urias@ciatej.mx

Dra. Elba Montserrat Alcázar Valle
ealcazar@ciatej.mx

Tecnología Ambiental

MC. Leonel Hernández Mena
lhernandez@ciatej.mx

Biotecnología Industrial

Dra. Rosa María Camacho Ruíz
rcamacho@ciatej.mx

Biotecnología Vegetal

Dra. Soledad García Morales
smorales@ciatej.mx

Biotecnología Médica y Farmacéutica

Dra. Alba Adriana Vallejo
avallejo@ciatej.mx

Unidad De Servicios Analíticos y Metrológicos (Usam)

Dra. Yadira Lugo Melchor
ylugo@ciatej.mx

M. en C. José de Jesús Díaz Torres
jdiaz@ciatej.mx

Subsede Sureste

Dra. Ana Luisa Ramos Díaz
aramos@ciatej.mx

Dra. Élica Gastélum Martínez
egastelum@ciatej.mx

Subsede Noreste

Dra. Noemi Nava Valente
nnava@ciatej.mx

Dr. Daniel Simón Olivo Alanís
dolivo@ciatej.mx

PROTEAA

Dr. Yair Romero Romero
yromero@ciatej.mx

EDITORES(AS) ASOCIADOS(AS)

EXTERNOS(AS)

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca - Instituto de Investigaciones Sociológicas (IISUABJO)

Dra. Virginia Guadalupe Reyes de la Cruz
vgreyes@iisuabjo.edu.mx

Dr. Manuel Garza Zepeda
mgarza.cat@uabjo.mx

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)

Dr. Gilber Vela Gutiérrez
gilber.vela@unicach.mx

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS)

Dra. María Guadalupe Ramírez Rojas
guadalupe.ramirez@ciesas.edu.mx

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)

Dra. Doris Arianna Leyva Trinidad
doris.leyva@ciad.mx

Universidad de Guadalajara (UDG)

Dr. Efrén Orozco López
lopez_efren@hotmail.com

Dr. David Sánchez Sánchez
mpsdauids@gmail.com

Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro)

Dr. Martín Fierro Leyva
martinfierroleyva@yahoo.com.mx

Dra. Teolincacihuahatl Romero Rosales
18029@uagro.mx

Tecnológico de Monterrey (Puebla)

Dr. Diego Armando Luna Vital
dieluna@tec.mx

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. (GEO)

Dra. Loecelia Ruvalcaba Sánchez
lruvalcaba@centrogeo.edu.mx

Colegio de Postgraduados (COLPOS)

Dr. Arturo Pérez Vázquez
parturo@colpos.mx

DISEÑO EDITORIAL

Producción y cuidado editorial

Lic. José Enrique Rentería Méndez
Lic. Jesús Fuentes González

Ilustración de portada y maquetación

Lic. Nayeli Citlalli Vallarta Díaz
Lic. José Enrique Rentería Méndez

CONTENIDO

9 **Carta editorial**



Desarrollo y procesos científicos y tecnológicos

15 **Propiedades tecnofuncionales y digestibilidad proteica de harina de grillo *Acheta domesticus* entera y desgrasada por fluido supercrítico**

Alejandro Dávalos-Vázquez, Lorena Moreno-Vilet, Oscar Abel Sánchez-Velázquez, Gustavo Castillo-Herrera, Judith Esmeralda Urías-Silva y Luis Mojica



Alimentación, salud y medioambiente

31 **Teledetección de la turbidez mediante la evaluación de modelos empíricos de predicción en el Lago de Chapala México**

Ramiro Vallejo-Rodríguez, Leonel Hernández-Mena, Jorge del Real-Olvera y José de Jesús Díaz-Torres

57 **Efecto de un plasma no térmico sobre la sobrevivencia de *Salmonella Typhimurium* y *Escherichia coli* O157:H7 inoculadas en cilantro (*Coriandrum sativum* L.)**

Alma Fabiola Araujo-Guzmán, Ana Tarin Gutiérrez-Ibañez, María Dolores Mariezcurrena-Berasain, Rosa Laura Ocaña-de Jesús, Antonio Laguna-Cerda e Itzel Rojas-Puebla



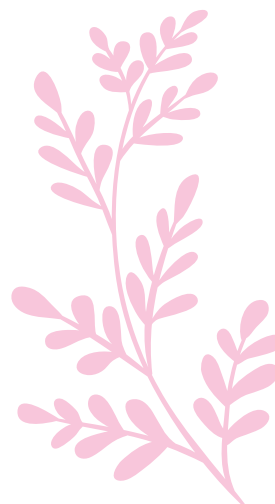
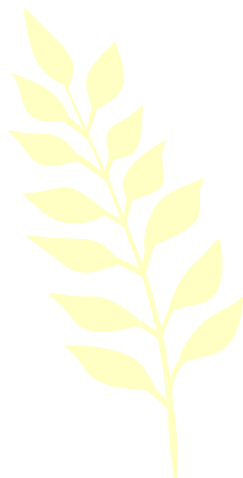
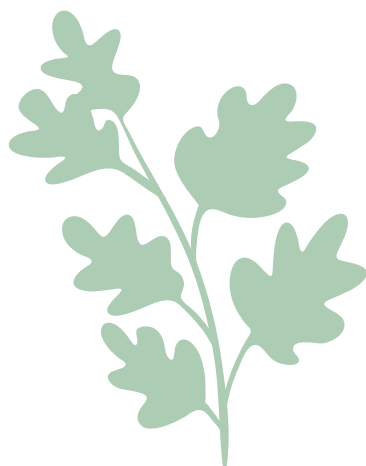
Sociedad y sistemas agroalimentarios

73 **Pluriactividad y migración: Retos a la soberanía alimentaria en la región de Los Petenes, Campeche**

Luis Arriola, Francisco Guízar-Vázquez, Lucio Pat-Fernández, Mirna Isela Vallejo-Nieto, Pablo Hernández-Bahena y Luvia del C. Padilla-Rebolledo

93 **Importancia cultural y nutricional de especies de frijol (*Phaseolus*) endémicas de México**

Kevin Matul-Ramos, David Fonseca Hernández, Lilia Carolina Acevez Mares, Elba Montserrat Alcázar Valle, Eugenia Lugo Cervantes y Luis Mojica





Bioinsumos para una agricultura sustentable

Control biológico de insectos plaga

- 111 **Los hongos entomopatógenos endémicos de México y su uso en el control microbiano de plagas**

Roberto Montesinos Matías, Marco A. Mellin Rosas y Jorge A. Sánchez González

- 125 **Micoinsecticidas, un engranaje más del proceso de sostenibilidad en la agricultura mexicana**

Karla Tatiana Murillo-Alonso, Víctor Manuel Hernández-Velázquez y Jhony Navat Enríquez-Vara

Control biológico de enfermedades y malezas

- 137 **Evaluación de la capacidad promotora del crecimiento vegetal y actividad antagonista contra hongos fitopatógenos de las bacterias *Streptomyces***

Fabiola Islas-Lugo, Valeria Gutiérrez-García, Andrés Cruz-Arredondo, Diana E. Ríos-Muñiz y Zahaed Evangelista-Martínez

- 149 **El uso de bacteriófagos para el control de enfermedades en la agricultura: un caso de estudio para el desarrollo de un biobactericida**

Rubén Antonio Olivares Terrones, Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar, Guillermo Alejandro Solís Sánchez, María Inés Siri Tomás y Gabriel Rincón Enríquez

- 163 **Elicitores para mejorar la producción vegetal: vacunas vegetales**

María del Sol Cuellar-Espejel, Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar, Rodolfo Hernández-Gutiérrez, Juan Carlos Mateos-Díaz, Sergio David Valerio-Landa y Gabriel Rincón-Enríquez

- 173 **El mundo invisible bajo nosotros para el desarrollo de bioherbicidas**

Angela Michelle González-López, Gabriel Rincón-Enríquez y Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar

- 183 **Subproductos del cultivo de yaca en México: fuente de metabolitos secundarios y proteína**

Carolina Calderón-Chiu, Montserrat Calderón-Santoyo y Juan Arturo Ragazzo-Sánchez

Microrganismo promotores de crecimiento vegetal

- 197 **Bacterias fijadoras de nitrógeno y *Trichoderma* en el crecimiento de las leguminosas *Mucuna pruriens* y *Phaseolus vulgaris***

Fernanda Chavarín-Flores, Andrés de Jesús López-Gervacio, Jhony Navat Enríquez-Vara, Elba Montserrat Alcázar-Valle y Soledad García-Morales

- 215 **Consortios nativos de hongos micorrícicos arbusculares y biochar en la promoción del crecimiento de plantas de girasol**

Luis López Pérez, Santiago Rubio Marcos y Alfredo Reyes Tena

- 231 **Evaluación de un bioproceso para la producción de ácido indol acético en *Bacillus subtilis***

Alejandro Quintana Menéndez, Diana De la cruz García, Hilda Vázquez López, Juan Gabriel Viguera Ramírez y Roberto Olivares Hernández

Bioinsumos aplicados en programas agroecológicos

- 245 **Experiencias en el uso de bioinsumos para la salud y la regeneración ecosistémica y comunitaria**

Sergio Arturo Roblada Mancilla, Leonel Alejandro Gavilanes Santillán, María de Lourdes González Gallegos, Rodolfo González Figueroa, Ezequiel Cárdenas Rodríguez y Alan Heinz



CARTA EDITORIAL

Sean bienvenidas y bienvenidos a Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad, la revista digital del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad se plantea como un instrumento de análisis y discusión inter y transdisciplinario sobre los sistemas agroalimentarios, salud, medio ambiente, tecnología y ciencias sociales.

Este segundo número del semestre julio - diciembre es un número especial titulado “Bioinsumos para una Agricultura Sustentable” coordinado por los investigadores Dr. Jhony Navat Enríquez Vara y el Dr. Gabriel Rincón Enriquez, ambos expertos en el tema. Las secciones regulares de la Revista la abre el artículo titulado “Propiedades tecnofuncionales y digestibilidad proteica de harina de grillo *Acheta domestica* entera y desgrasada por fluido supercrítico”, en él se describen las propiedades tecnofuncionales y la digestibilidad proteica de la harina de grillo *Acheta domestica* desgrasada (HGS) y sin desgrasar (HG). Se evalúa su capacidad y estabilidad emulsionante, gelificación, retención de agua/aceite y capacidad espumante en diferentes condiciones de pH. La sección Alimentación, Salud y Medio ambiente la integran dos artículos. En el primer artículo, titulado “Teledetección de la turbidez en el Lago de Chapala mediante la evaluación de modelos empíricos de predicción”, los autores realizan un análisis de los cambios radiométricos en los detectores del satélite Landsat-8 que representan avances significativos en la teledetección aplicada a la calidad del agua. Los colaboradores del artículo “Efecto de un plasma no térmico sobre la sobrevivencia de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 inoculadas en cilantro (*Coriandrum sativum* L.)” establecieron bajo condiciones de invernadero tres tratamientos con 60 plantas cada uno para determinar el efecto de un plasma no térmico sobre la sobrevivencia de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 en plantas de cilantro. Por último, la sección Sociedad y sistemas agroalimentarios la conforman los artículos titulados “Pluriactividad y migración: Retos a la soberanía alimentaria en la región de Los Petenes, Campeche” e “Importancia cultural y nutricional de especies endémicas de frijol de México del género *Phaseolus* spp”, el primero de ellos presenta un análisis preliminar sobre los retos para la producción agrícola de autoconsumo en tres comunidades mayas de la zona de Los Petenes, en el norte de Campeche; en el segundo, se recopila información sobre tres especies del género *Phaseolus* (*P. coccineus* L., *P. lunatus* L. y *P. polyanthus* L.), las cuales, a pesar de no ser comúnmente conocidas, tienen un importante valor nutricional y cultural. Se describe la distribución, importancia culinaria y potencial biológico de las distintas especies, así como las zonas biogeográficas donde se cultiva cada una.

En la era actual, caracterizada por desafíos ambientales y la necesidad imperiosa de prácticas agrícolas sostenibles, el uso de bioinsumos emerge como una solución prometedora. Los bioinsumos, productos derivados de organismos vivos que mejoran la salud del suelo y aumentan la productividad agrícola, representan un paso hacia un futuro más saludable y equilibrado para nuestro planeta. En este contexto, es crucial destacar los beneficios significativos que los bioinsumos aportan tanto a los agricultores como al medio ambiente.

Este número especial “Bioinsumos para una Agricultura Sustentable” comprende 11 artículos que presentan investigaciones originales, estudios de casos, análisis y reflexiones en torno al estudio y aplicación de los bioinsumos en la agricultura mexicana. Los insumos biológicos (bioinsumos) se han convertido en un tema de actualidad debido al papel que juegan en la sustentabilidad de la agricultura como el mejoramiento de los suelos, promover el crecimiento de las plantas, aumentar la productividad de los cultivos y en el control de plagas y enfermedades de las plantas. Además, en los últimos años se ha incrementado el uso de los bioinsumos por los pequeños productores para la regeneración de los agroecosistemas, aumento en la productividad de sus cultivos y producción de alimentos libres de agrotóxicos.

En este número se presentan dos trabajos sobre el control biológico de insectos plaga con hongos entomopatógenos. Los artículos tratan sobre el aprovechamiento de los hongos entomopatógenos que se han aislado y caracterizado a lo largo del país por el Centro Nacional de Referencia de Control Biológico del SENASICA, y su uso en programas de control de plagas de importancia nacional. En otro de los trabajos se reflexiona sobre los bioinsumos a base de hongos entomopatógenos denominados micoinsecticidas y la disponibilidad de productos comerciales en el país.

Otro de los tópicos del número es el control biológico de enfermedades y malezas. Los artículos tratan sobre el potencial de las actinobacterias para el control de fitopatógenos, promoción del crecimiento y manejo de malezas con la propuesta de elaboración de bioherbicidas, además, se presenta un estudio de caso sobre el desarrollo de un biobactericida a base de bacteriófagos para el manejo de enfermedades por bacterias en las plantas. También se presenta una revisión sobre el uso de elicitores (inductores) en la agricultura para fortalecer a las plantas contra sus patógenos. Por último, uno de los trabajos aborda el tema del potencial de los subproductos del cultivo de yaca entre los que se encuentran los metabolitos secundarios para el manejo de hongos fitopatógenos.

En el tópico microorganismos promotores del crecimiento vegetal se presentan artículos sobre bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos promotores de crecimiento como *Trichoderma* y hongos micorrízicos arbusculares. Además, se propone que, mediante el mejorador de suelo denominado biochar, la estructura del suelo mejora

y favorece la colonización de las micorrizas. Por último, uno de los trabajos aborda el diseño de un bioproceso y la factibilidad económica de producir ácido indol acético (AIA) por *Bacillus subtilis*. El AIA es una hormona vegetal que favorece el crecimiento de las plantas, en el trabajo que se presenta en este número se proponen utilizar directamente el sobrenadante de la fermentación de *B. subtilis* para que sea rentable la aplicación en la agricultura.

Finalmente, se incluyó un tópico sobre los bioinsumos aplicados en programas agroecológicos. En esta sección se presenta un artículo de las experiencias de cinco comunidades de aprendizaje sobre la elaboración de bioinsumos y su aplicación en varios cultivos del centro occidente de México. Las comunidades de aprendizaje se conformaron en el Programa Interinstitucional de Especialidades en Soberanía Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica del CIATEJ (PIES AGILES). Entre las reflexiones más importantes que presentan los autores son: los propios productores pueden elaborar sus bioinsumos, estos tienen la capacidad de mejorar la productividad, calidad y sanidad de los cultivos y minimizar los daños al medio ambiente.

Jhony Navat Enríquez Vara¹
Gabriel Rincón Enríquez²
Editores invitados

¹ Laboratorio de Entomología, Biotecnología Vegetal, CONAHCYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Zapopan, Jalisco.

² Laboratorio de Fitopatología, Biotecnología Vegetal-CIATEJ, Zapopan, Jalisco.





DESARROLLO Y PROCESOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS





Propiedades tecnofuncionales y digestibilidad proteica de harina de grillo *Acheta domesticus* entera y desgrasada por fluidos supercríticos

Dávalos-Vázquez Alejandro¹, Lorena Moreno-Vilet¹, Óscar Abel Sánchez-Velázquez¹, Gustavo Castillo-Herrera¹, Judith Esmeralda Urías-Silva¹ y Luis Mojica^{1*}

¹Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero #1227, Col. El Bajío Arenal, 45019 Zapopan, Jalisco, Mexico.

*Autor de correspondencia: lmojica@ciatej.mx

Palabras clave:

entomofagia, proteínas alternativas, proteína, tecnologías verdes

Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad, 2(2), 15-27. ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12761387>

Recibido: 17 abril 2024
Revisado: 03 de junio 2024
Aceptado: 17 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

La harina de grillo *Acheta domesticus* se postula como una fuente alternativa de proteína. El objetivo de este trabajo fue describir las propiedades tecnofuncionales y la digestibilidad proteica de la harina de grillo *Acheta domesticus* desgrasada (HGS) y sin desgrasar (HG). Se evaluó su capacidad y estabilidad emulsionante, gelificación, retención de agua/aceite y capacidad espumante en diferentes condiciones de pH. Se encontró que la HGS tenía una mejor actividad emulsionante y mayor estabilidad de emulsión a pH 3.0. Además, HGS mostró mayor retención de agua/aceite. Se observó gelificación en soluciones al 30%. HGS mostró una mayor capacidad de espumado a pH 7.0 del 83.33% y una estabilidad de espumado del 54.7%. No hubo diferencias significativas en la digestibilidad proteica entre HGS y HG. La harina de grillo desgrasada presenta mejores propiedades tecnofuncionales, lo que la hace potencialmente útil en la formulación de alimentos para mejorar su perfil nutricional.

Introducción

Los insectos han formado parte de la dieta de los humanos desde la antigüedad. En diferentes culturas alrededor del mundo como México, China, Perú, Colombia y Tailandia siguen siendo consumidos de forma cotidiana, siendo una práctica conocida como entomofagia (Liceaga, 2022; Villaseñor *et al.*, 2022). Los insectos brindan una gran cantidad de macronutrientes, destacando las proteínas, que por su contenido de aminoácidos esenciales es



comparable con la carne, postulando a la entomofagia como una fuente alternativa de proteína de alto valor biológico (Liceaga, 2022).

El grillo común (*Acheta domestica*), perteneciente al orden Ortóptera, es rico en proteínas, contiene del 41.8 al 75.2% en base seca. Comparado con otras especies de grillos, es quien posee un mayor contenido de proteína (Liceaga, 2022; Ververis *et al.*, 2022). Los principales aminoácidos esenciales que podemos encontrar en grillos son la leucina, lisina y valina; mientras que no esenciales, el ácido glutámico, alanina y ácido aspártico (Brogan, 2018). Su contenido de lípidos puede variar de 7.5-35% dependiendo la dieta y la etapa de vida en la que se encuentre (Ververis *et al.*, 2022).

Los grillos son procesados para generar ingredientes ricos en proteína, utilizando métodos como congelación, secado, molido y tamizado, necesarios para la obtención de harina de grillo, siendo estas presentaciones en la que principalmente se comercializan (Turck *et al.*, 2022). Sin embargo, para aumentar el contenido de proteína de la harina es necesario emplear procesos como el desgrasado para eliminar la grasa. La mayoría de los procesos de desgrasado reportados en insectos involucran el uso de solventes como hexano o n-pentano, los cuales pueden ser dañinos para la salud y para el medio ambiente (Bose *et al.*, 2021; Psarianos *et al.*, 2022).

Una alternativa al desgrasado con solventes es la tecnología de fluidos supercríticos que consiste en utilizar dióxido de carbono (CO₂) a altas presiones como solvente para la extracción de compuestos como lípidos, compuestos fenólicos y alcaloides (Ibáñez *et al.*, 2015; Pushpangadan & George, 2012). Esta tecnología es considerada una alternativa sustentable para producir ingredientes y compuestos bioactivos de fuentes naturales debido a la naturaleza no polar del CO₂, y se postula como una alternativa al uso de solventes como el hexano en fuentes alimenticias, incluyendo los insectos (Fornari, 2016; Sipponen *et al.*, 2018).

En la actualidad la industria alimentaria está empezando a innovar en la formulación de nuevos productos al incluir ingredientes a base de insectos, añadiendo ingredientes de grillo en productos como pan, harinas, yogur, helado, pasta, *snacks*, carnes y sustratos fermentables, entre otros. Gracias a las características tecnofuncionales y nutrimentales que poseen los ingredientes a base de insectos, se busca enriquecer los alimentos incrementando su contenido de proteína (Bisconsin-Júnior *et al.*, 2022; Villaseñor *et al.*, 2021).

Debido a la escasa información disponible y la limitada aplicación de la tecnología de fluidos supercríticos en insectos, el objetivo de este trabajo fue describir las propiedades tecnofuncionales y digestibilidad proteica de la harina de grillo *Acheta domestica* entera y desgrasada utilizando extracción por fluidos supercríticos.



Metodología

Materiales y reactivos

La harina de grillo (HG) (*Acheta domestica*) fue donada por la empresa Cricckex® (Zapopan, México). Es un polvo de color café claro obtenido por deshidratación, molienda y tamizado de los grillos enteros. Ácido cítrico, hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, ácido acético, acetato de sodio, bifosfato de sodio, fosfato disódico, caseinato de potasio, tripsina, quimotripsina y peptidasa fueron comprados en Sigma Aldrich (MO, EUA). El aceite de girasol fue comprado en una tienda local.

Los análisis bromatológicos fueron realizados en cada muestra de acuerdo con las siguientes normatividades: humedad NMX-F-083-1996, cenizas NMX-F607-NORMEX-2020, grasa NOM-086-SSA1-1994, proteína NMX-F-608-NORMEX-2011, fibra cruda NMX-F-613-NORMEX-2017, fibra dietética, soluble e insoluble NMX-622-NORMEX-2008. Los hidratos de carbono totales fueron calculados por diferencia de análisis proximal.

Desgrasado por extracción de fluidos supercríticos (SFE)

Se colocaron alrededor de 2 kg de harina de grillo en un extractor de fluidos supercríticos Thar Technologies-Water-SFE-500® MR (Thar Designs, Inc., PA, EUA.). El dióxido de carbono se bombeó a un flujo constante de 10-30 g/min durante una presión de 300-450 bar durante 8-12 h a 30-80 °C. La harina desgrasada se etiquetó como HGS y se almacenó a -5 °C hasta su posterior análisis.

Propiedades tecnofuncionales

Actividad y estabilidad de emulsión

La actividad de la emulsión (AE) se evaluó según la metodología reportada por Alfaro-Diaz *et al.* (2021) y Villaseñor *et al.* (2022) con modificaciones. Se realizaron soluciones de HGS y HG al 2.5% (p/v) mezclando en buffer citrato (pH 3.0), buffer acetato (pH 4.0), buffer acetato (pH 5.0) y buffer fosfato (pH 7.0). Se centrifugó a 3,000 g por 5 min, se tomaron 2 mL de sobrenadante y se mezcló con aceite de girasol en una relación 1:1 en un tubo cónico de 15 mL. Las muestras se emulsionaron a 20,000 rpm con un homogeneizador (Ultra Turrax® IKA T25, Carolina del Norte, EUA.) y se centrifugaron a 400 g por 5 min. La actividad de la emulsión se midió como la altura de la capa emulsionada entre la altura de la solución total usando la ecuación 1.

$$AE(\%) = \frac{\text{altura de la capa emulsificada}}{\text{altura de la solución total}} \times 100 \quad [1]$$



La estabilidad de emulsión (EE) de las muestras se realizó calentando las emulsiones durante 30 min a 80 °C. Posteriormente, los tubos se centrifugaron a 400 g por 5 min. Los resultados se calcularon con la ecuación 1.

Retención de agua y aceite

La capacidad de retención de agua (RA) y capacidad de retención de aceite (RE) se evaluó según la metodología reportada por Alfaro-Díaz *et al.* (2021) y Villaseñor *et al.* (2022). Se realizaron soluciones de HGS y HG al 1% (p/v) en agua o aceite de girasol agitados por 30 s en vortex. Las soluciones fueron centrifugadas a 1,240 g por 10 min y decantadas. El resultado fue expresado en gramos de agua/aceite retenido por gramo de muestra.

Gelificación

La capacidad gelificante (CG) se evaluó según la metodología reportada por Alfaro-Díaz *et al.* (2021) y Villaseñor *et al.* (2022) con modificaciones. Se realizaron soluciones de HGS y HG a diferentes concentraciones (5-30% p/v) en tubos de 15 mL. Las soluciones fueron calentadas en termobañó a 80 °C por 1 h y refrigerados a 4 °C por 2 h. La identificación de concentración mínima de gel fue determinada por inversión de los tubos.

Actividad espumante

La capacidad espumante (CE) y la estabilidad espumante (EES) se evaluaron según la metodología reportada por Alfaro-Díaz *et al.* (2021) y Villaseñor *et al.* (2022) con modificaciones. Se realizaron soluciones de HGS y HG al 1% (p/v) utilizando los buffers mencionados con anterioridad a pH 3.0, 4.0, 5.0 y 7.0. Se centrifugaron a 400 g por 5 min, se tomaron 5 mL de cada solución y se homogeneizaron a 13,000 rpm durante 1 min. La espuma se midió a tiempo cero y después de 30 min. La CE se midió como la altura de la espuma entre el volumen inicial de acuerdo con la ecuación 2.

$$CE(\%) = \frac{\text{altura de la espuma}}{\text{altura del volumen inicial}} \times 100 \quad [2]$$

Digestibilidad proteica *in vitro*

La digestibilidad proteica de HGS y HG fue determinada por la metodología reportada por Sandoval-Oliveros y Paredes-López (2013) utilizando caseína (Cas) como control. Se realizaron soluciones con un volumen de 50 mL de HGS y HG a una concentración de 6.25 mg/mL, las soluciones se ajustaron a pH 8.0 utilizando HCl y NaOH. Se agregaron 5 mL de solución multienzimática (1.6 mg/mL de tripsina, 3.1 mg/mL de quimotripsina y 1.3 mg/mL de peptidasa) y fueron incubadas en



termobañó con agitación constante a 37 °C por 10 min. Las soluciones fueron inmediatamente enfriadas con hielo y se midió el pH para determinar el porcentaje de solubilidad utilizando la ecuación 3.

$$y = 210.464 - 18.3x \quad [3]$$

Análisis estadístico

Cada unidad experimental fue tomada de un lote de harina de grillo. Los tratamientos fueron ejecutados por triplicado. Los resultados fueron reportados como promedio y desviación estándar (DS). Los resultados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$) y las diferencias entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de Tukey. Las pruebas analíticas fueron ejecutadas en STATGRAPHICS Centurion XV.II.

Resultados y discusión

Composición nutrimental

La Tabla 1 muestra la composición nutrimental de HGS y HG, donde los principales parámetros donde se observaron diferencias son proteína y grasa. Como se esperaba, HGS mostró un mayor contenido de proteína y un menor contenido de grasa comparado con HG. La eficiencia de desgrasado para HGS fue de 84.88%, el cual es un valor superior al reportado por Sipponen *et al.* (2018) de 79% utilizando un flujo de CO₂ 12.5 L/h, con una temperatura de 40-46 °C a una presión de 300 bar.

Tabla 1. Composición nutrimental de harinas de grillo

Parámetro (%)	HG	HGS
Humedad	3.94 ± 0.06 ^A	3.84 ± 0.04 ^A
Cenizas	4.01 ± 0.01 ^B	5.05 ± 0.01 ^A
Grasa	22.74 ± 0.05 ^A	3.44 ± 0.02 ^B
Proteína	58.06 ± 0.04 ^B	77.38 ± 0.05 ^A
Hidratos de carbono totales	11.25 ± 0.08 ^A	10.29 ± 0.01 ^B
Fibra cruda	5.27 ± 0.04 ^B	8.21 ± 0.03 ^A
Fibra dietética total	11.16 ± 0.04 ^A	10.16 ± 0.01 ^B
Fibra dietética soluble	0.14 ± 0.01 ^A	<0.1 ± 0.00 ^B
Fibra dietética insoluble	11.02 ± 0.04 ^A	10.16 ± 0.01 ^B

HG: harina de grillo, HGS, harina de grillo desgrasada por hexano, HGS: harina de grillo desgrasada por extracción de fluido supercrítico. Los resultados se expresaron como media ± desviaciones estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

El contenido de grasa disminuyó de 22.74% ± 0.05 en HG a 3.44% ± 0.02 en HGS. Sipponen *et al.* (2018) reportan un mayor contenido de grasa de 4.8% tras el desgrasado. Mayores contenidos de grasa en harina de grillo desgrasada han sido reportados por otros autores utilizando solventes. Tzompa-Sosa *et al.* (2014) reportan



un contenido de grasa del 6% utilizando método Soxhlet; por otro lado, Ndiritu *et al.* (2017) reportan un contenido de 6.46% utilizando hexano 1:5 (p/v).

El contenido de proteína aumentó de $58.06\% \pm 0.04$ en HG a 77.38 ± 0.05 en HGS. Sipponen *et al.* (2018) reportan un menor contenido de proteína del 60% tras el desgrasado con CO₂. Otros autores reportan contenidos similares de proteína en harina de grillo desgrasada con solventes. Bolat *et al.* (2021) reportan contenido de proteína 79-81% tras desgrasar con hexano con extracción asistida por altas presiones hidrostáticas utilizando diferentes presiones y temperaturas. Ndiritu *et al.* (2017) reportan un contenido de proteína 72.63% tras desgrasar con hexano; mientras que Turck *et al.* (2022), un contenido de proteína de 75.3% en harina parcialmente desgrasada con hexano.

El contenido de proteína fue determinado por el método de Kjeldahl utilizando un factor de conversión de nitrógeno de 6.25; sin embargo, el contenido de proteína podría verse sobreestimado debido al contenido nitrógeno no proteico presente en la quitina. Boulos *et al.* (2020) proponen un factor de conversión de nitrógeno de 5.33 para harinas y 5.6 para aislados de proteína de insectos, y específicamente un factor de conversión de 5.25 para *Acheta domesticus*, esto basado en revisiones bibliográficas del contenido de aminoácidos. Ritvanen *et al.* (2020) proponen un factor de conversión de nitrógeno de 5 para dos especies de grillos (*Acheta domesticus* y *Grillus bimaculatus*), esto tras analizar el contenido de nitrógeno y aminoácidos.

El contenido de fibra dietética total disminuyó de $11.6\% \pm 0.04$ en HG a $10.16\% \pm 0.01$ en HGS tras el desgrasado, afectando consigo el contenido de fibra soluble e insoluble que también se ven disminuidos tras el desgrasado, esto podría deberse al tipo de polisacáridos que podría estar ligado a la grasa. Inversamente, el contenido de fibra cruda se ve aumentado de $5.27\% \pm 0.04$ en HG a $8.21\% \pm 0.03$ en HGS, esto puede estar relacionado al contenido de quitina, aumentando su proporción tras el desgrasado.

Propiedades tecnofuncionales

Actividad y estabilidad de emulsión

La Figura 1 A) muestra que no existe diferencias significativas en la AE entre HG y HGS a pH 3 y pH 5; sin embargo, en la Figura 1 B) se puede observar que HGS a pH 3.0 muestra una EE del 100% comparada con HG y HGS a pH 3.0 y pH 5.0. Kim *et al.* (2017) reportan una AE de 45% en soluciones a 2.1 M de NaOH. Para EE Lucas-González *et al.* (2019) reportan 95% de estabilidad en harina liofilizada, similar a lo observado en este trabajo.

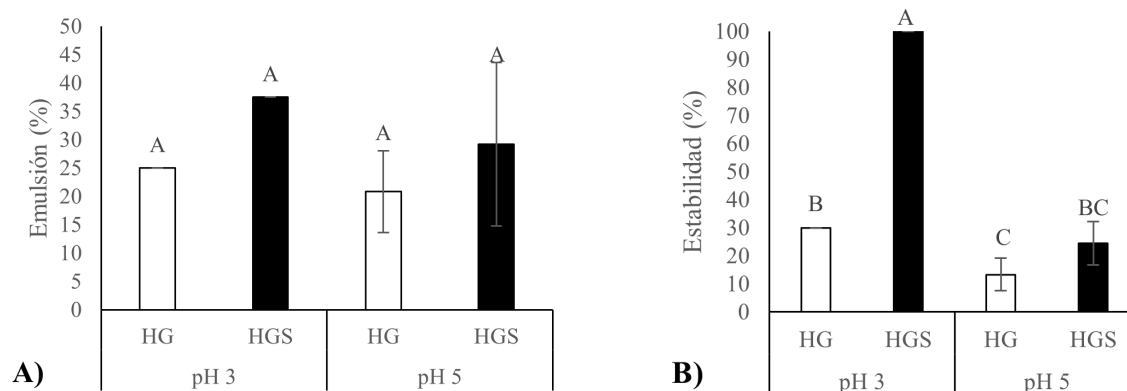


Figura 1. A) Actividad de emulsión de HG y HGS. B). Estabilidad de emulsión 30 minutos después. HG: harina de grillo, HGS: harina de grillo desgrasada por fluido supercrítico. Los resultados se expresaron como media \pm desviaciones estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

El aumento de EE en HGS podría estar relacionado al bajo contenido de grasa, permitiendo una mayor interacción de las grasas entre las regiones hidrofílicas e hidrofóbicas de los aminoácidos (Purschke *et al.*, 2018).

Retención de agua y aceite

La Figura 2 muestra la capacidad de retención de agua (A) y aceite (B), para ambas pruebas HGS mostró una mayor capacidad de retención. Lucas-González *et al.* (2019) reportan una RA 2.86 g/g de muestra y una RE de 3.21 g/g de muestra, siendo muy similar a lo observado para HGS para retención de agua. El aumento en el contenido de proteína en HGS podría estar relacionado con el aumento de RA y RE, ya que la concentración de proteína, conformación de proteínas y el perfil de aminoácidos pueden afectar la retención (Verhoeckx *et al.*, 2014).

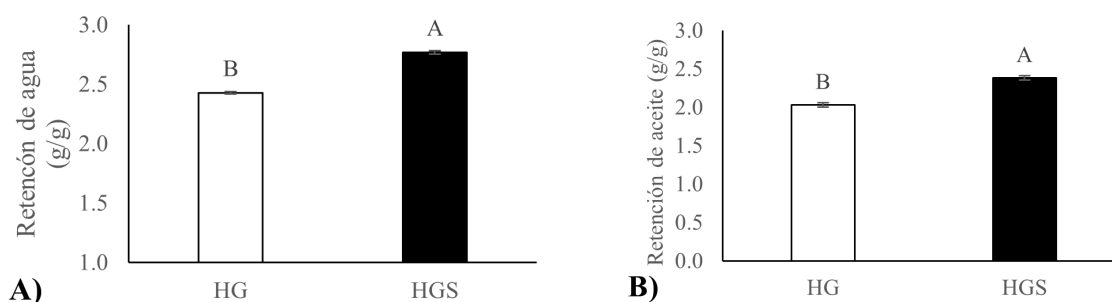


Figura 2. A) retención de agua (RA) en HG y HGS. B) retención de aceite (RE) en HG y HGS. HG: harina de grillo, HGS: harina de grillo desgrasada por fluido supercrítico. Los resultados se expresaron como media \pm desviaciones estándar. Diferentes letras indican (Villaseñor *et al.*, 2021) diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

Gelificación

La Tabla 2 muestra la capacidad gelificante de HG y HGS, observando aparición de gel hasta una concentración del 30% (p/v). Yi *et al.* (2013) mencionan la aparición



de gel en concentraciones mayores de 30% de proteína de grillo en pH neutro o alcalino, siendo similar a lo observado en este trabajo. La capacidad gelificante está relacionada a la capacidad de agregación de las proteínas debido a las interacciones de los puentes disulfuro e interacciones hidrofóbicas (Purschke *et al.*, 2018; Yi *et al.*, 2013). La aparición de gel en este trabajo podría estar relacionado al procesamiento y a la desnaturalización de las proteínas generadas por el tratamiento térmico (Villaseñor *et al.*, 2021).

Tabla 2. Concentración mínima para la formación de gel

Muestra	Concentración (p/v)					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
HG	X	X	X	X	X	O
HGS	X	X	X	X	X	O

X: sin formación de gel, O: formación de gel. HG: harina de grillo, HGS: harina de grillo desgrasada por fluido supercrítico.

Capacidad espumante y estabilidad

La Figura 3 A) muestra la CE a diferente pH, observándose una mayor capacidad espumante en HGS a pH 7.0, HG a pH 3.0 no mostró capacidad espumante. Así mismo, HGS a pH 7.0 mostró una mayor EES después de 30 min (Figura 3 B). Este comportamiento podría estar relacionado a estar cerca de un pH alcalino donde existe una mayor solubilidad de proteína. Yi *et al.* (2013) mencionan una mayor CE a pH 3.0; sin embargo, no se observó CE a pH 3.0 en este trabajo. Lucas-González *et al.* (2019) reportan una EES de 75% en harina liofilizada, mayor a lo observado en este trabajo. El aumento en CE y EES para HGS podría estar relacionado a una posible alteración en la estructura de las proteínas generadas por la aplicación de presión en el proceso de desgrasado, la cual podría afectar la hidrofobicidad de la superficie de las proteínas (Mishyna *et al.*, 2021; Sipponen *et al.*, 2018).

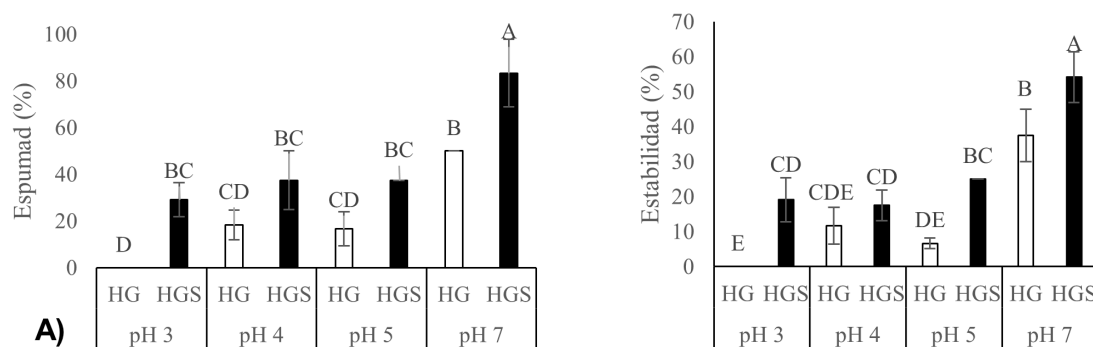


Figura 3. A) Capacidad espumante de HG y HGS. B) Estabilidad de espumado 30 minutos después. HG: harina de grillo, HGS: harina de grillo desgrasada por fluido supercrítico. Los resultados se expresaron como media \pm desviaciones estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

Digestibilidad proteica *in vitro*

La Figura 4 muestra la digestibilidad proteica *in vitro* de HG y HGS comparada con caseína. No hay diferencia significativa en la digestibilidad proteica de HG y HGS, lo cual podría indicar que el proceso de desgrasado por SFE y la grasa en sí no afectan a la digestibilidad de la proteína. Valores similares de digestibilidad proteica se pueden encontrar en chícharo, frijol, lenteja, sorgo, cáñamo y concentrado de proteína de avena (Kaur *et al.*, 2022). Por otro lado, Xue *et al.* (2020) mencionan que los tratamientos a altas presiones mejoran la digestibilidad de las proteínas como actina, miosina y troponina.

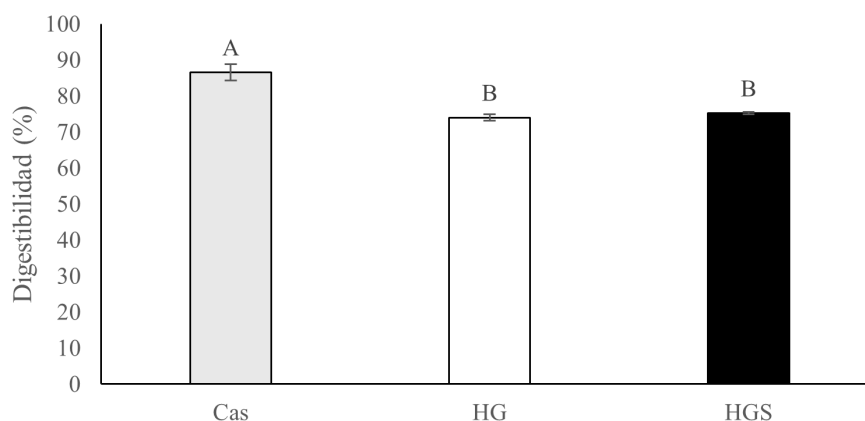


Figura 4. Digestibilidad proteica *in vitro*. Cas: caseína, HG: harina de grillo, HGS: harina de grillo desgrasada por fluido supercrítico. Los resultados se expresaron como media \pm desviaciones estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$) de acuerdo a la prueba de Tukey.

Conclusión

El método de desgrasado por extracción con fluidos supercríticos se postula como una alternativa innovadora al uso de solventes para la eliminación de grasa. Al comparar con la muestra sin desgrasar, este método de desgrasado ayuda a aumentar el contenido de proteínas hasta en un 80%; sin embargo, la utilización de un factor de conversión de nitrógeno adecuado para *Achetad domesticus* es importante para evitar sobreestimar el contenido de proteína. La harina de grillo desgrasada por extracción con fluido supercrítico mostró mejor estabilidad de emulsión, capacidad emulsificante, retención de agua/aceite y capacidad de espumado a diferentes condiciones comparada con la harina sin desgrasar. El método de desgrasado por extracción de fluidos supercríticos no afecta la digestibilidad proteica de la harina, conservando una alta digestibilidad. Debido a sus propiedades tecnofuncionales, las harinas de grillo podrían ser empleadas en la formulación de productos alimenticios para aumentar su contenido proteico. El contenido de fibra dietética y fibra cruda se ven afectados tras el desgrasado por extracción con fluidos supercríticos, por lo



cual sería necesario la descripción de polisacáridos presentes en las harinas de grillo para encontrar una relación con la grasa. El desarrollo de métodos innovadores para generar ingredientes proteicos de grillo podría mejorar la aceptabilidad de los consumidores y podrían aplicarse en la formulación de alimentos para aumentar su contenido proteico. Es necesario realizar ensayos para caracterizar su potencial biológico de los ingredientes derivados del grillo. Considerando que es una metodología libre de solventes, se considera un proceso amigable con el medio ambiente.

Conflicto de interés

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el fondo del COECYTJAL “GRUPO DE TRABAJO QUEBEC-JALISCO” 9831-2022 y el CONAHCYT por la beca (822320) para el primer autor.

Agradecimientos

Gracias a la empresa CrickeX® por donar la muestra para realizar el presente estudio.

Referencias

- Alfaro-Díaz, A., Urías-Silvas, J. E., Loarca-Piña, G., Gaytan-Martínez, M., Prado-Ramírez, R., & Mojica, L. (2021). Techno-functional properties of thermally treated black bean protein concentrate generated through ultrafiltration process. *LWT*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110296>
- Biconsin-Júnior, A., Rodrigues, H., Behrens, J. H., da Silva, M. A. A. P., & Mariutti, L. R. B. (2022). “Food made with edible insects”: Exploring the social representation of entomophagy where it is unfamiliar. *Appetite*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2022.106001>
- Bolat, B., Ugur, A. E., Oztop, M. H., & Alpas, H. (2021). Effects of High Hydrostatic Pressure assisted degreasing on the technological properties of insect powders obtained from *Acheta domesticus* & *Tenebrio molitor*. *Journal of Food Engineering*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110359>
- Bose, U., Broadbent, J. A., Juhász, A., Karnaneedi, S., Johnston, E. B., Stockwell, S., Byrne, K., Limvipuvadh, V., Maurer-Stroh, S., Lopata, A. L., & Colgrave, M. L. (2021). Protein extraction protocols for optimal proteome measurement and arginine kinase quantitation from cricket *Acheta domesticus* for food safety assessment. *Food Chemistry*, 348, 129110. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.129110>



- Boulos, S., Tännler, A., & Nyström, L. (2020). Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Edible Insects on the Swiss Market: *T. molitor*, *A. domesticus*, and *L. migratoria*. *Frontiers in Nutrition*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00089>
- Brogan, E. N. (2018). *Protein and Lipid Characterization of Acheta domesticus, Bombyx Protein and Lipid Characterization of Acheta domesticus, Bombyx mori, and Locusta migratoria Dry Flours mori, and Locusta migratoria Dry Flours* [tesis de maestría, Davis College of Agriculture, Natural Resources and Design]. <https://researchrepository.wvu.edu/etd/7498>
- Fornari, T. (2016). Supercritical CO₂ Extraction: Relevance to Food Processing. En *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.03111-5>
- Ibáñez, E., Mendiola, J. A., & Castro-Puyana, M. (2015). Supercritical Fluid Extraction. En B. Caballero, P. M. Finglas & F. Toldrá (eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 227–233). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00675-9>
- Kaur, L., Mao, B., Beniwal, A. S., Abhilasha, Kaur, R., Chian, F. M., & Singh, J. (2022). Alternative proteins vs animal proteins: The influence of structure and processing on their gastro-small intestinal digestion. *Trends in Food Science and Technology*, 122, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.021>
- Kim, H. W., Setyabrata, D., Lee, Y. J., Jones, O. G., & Kim, Y. H. B. (2017). Effect of House Cricket (*Acheta domesticus*) Flour Addition on Physicochemical and Textural Properties of Meat Emulsion Under Various Formulations. *Journal of Food Science*, 82(12), 2787–2793. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13960>
- Liceaga, A. M. (2021). Processing insects for use in the food and feed industry. *Current Opinion in Insect Science*, 48, 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.08.002>
- Liceaga, A. M. (2022). Edible insects, a valuable protein source from ancient to modern times. *Advances in Food and Nutrition Research*, 101, 129–152. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.04.002>
- Lucas-González, R., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. A., & Viuda-Martos, M. (2019). Effect of drying processes in the chemical, physico-chemical, techno-functional and antioxidant properties of flours obtained from house cricket (*Acheta domesticus*). *European Food Research and Technology*, 245(7), 1451–1458. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03301-4>
- Mishyna, M., Keppler, J. K., & Chen, J. (2021). Techno-functional properties of edible insect proteins and effects of processing. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101508>
- Ndiritu, A. K., Kinyuru, J. N., Kenji, G. M., & Gichuhi, P. N. (2017). Extraction technique influences the physico-chemical characteristics and functional pro-



- properties of edible crickets (*Acheta domesticus*) protein concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 2013–2021. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9584-4>
- Psarianos, M., Dimopoulos, G., Ojha, S., Cavini, A. C. M., Bußler, S., Taoukis, P., & Schlüter, O. K. (2022). Effect of pulsed electric fields on cricket (*Acheta domesticus*) flour: Extraction yield (protein, fat and chitin) and techno-functional properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102908>
- Purschke, B., Tanzmeister, H., Meinschmidt, P., Baumgartner, S., Lauter, K., & Jäger, H. (2018). Recovery of soluble proteins from migratory locust (*Locusta migratoria*) and characterisation of their compositional and techno-functional properties. *Food Research International*, 106, 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.067>
- Pushpangadan, P., & George, V. (2012). Basil. En K. V. Peter (ed.), *Handbook of Herbs and Spices: Second Edition* (Vol. 1, pp. 55–72). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857095671.55>
- Ritvanen, T., Pastell, H., Welling, A., & Raatikainen, M. (2020). The nitrogen-to-protein conversion factor of two cricket species - *Acheta domesticus* and *Gryllus bimaculatus*. *Agricultural and Food Science*, 29(1), 1–5. <https://doi.org/10.23986/afsci.89101>
- Sandoval-Oliveros, M. R., & Paredes-López, O. (2013). Isolation and characterization of proteins from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(1), 193–201. <https://doi.org/10.1021/jf3034978>
- Sipponen, M. H., Mäkinen, O. E., Rommi, K., Heiniö, R. L., Holopainen-Mantila, U., Hokkanen, S., Hakala, T. K., & Nordlund, E. (2018). Biochemical and sensory characteristics of the cricket and mealworm fractions from supercritical carbon dioxide extraction and air classification. *European Food Research and Technology*, 244(1), 19–29. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2931-1>
- Turck, D., Bohn, T., Castenmiller, J., De Henauw, S., Hirsch-Ernst, K. I., Maciuk, A., Mangelsdorf, I., McArdle, H. J., Naska, A., Pelaez, C., Pentieva, K., Siani, A., Thies, F., Tsabouri, S., Vinceti, M., Cubadda, F., Frenzel, T., Heinonen, M., Marchelli, R., ... Knutsen, H. K. (2022). Safety of partially defatted house cricket (*Acheta domesticus*) powder as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 20(5). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7258>
- Tzompa-Sosa, D. A., Yi, L., van Valenberg, H. J. F., van Boekel, M. A. J. S., & Lakemond, C. M. M. (2014). Insect lipid profile: Aqueous versus organic solvent-based extraction methods. *Food Research International*, 62, 1087–1094. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.052>



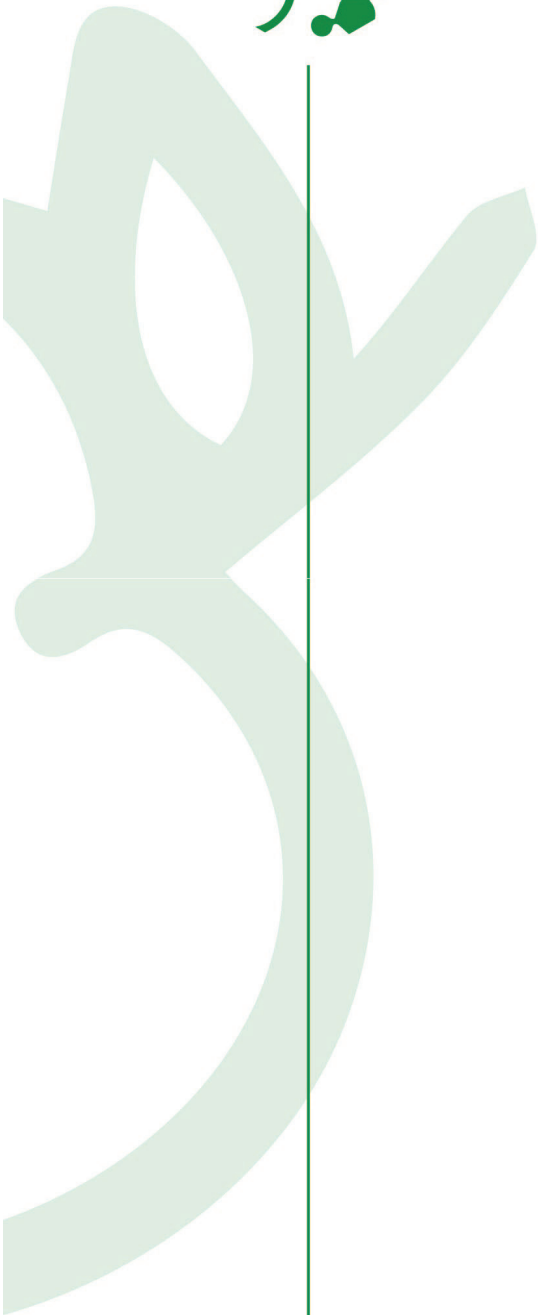
- Verhoeckx, K. C. M., van Broekhoven, S., den Hartog-Jager, C. F., Gaspari, M., de Jong, G. A. H., Wichers, H. J., van Hoffen, E., Houben, G. F., & Knulst, A. C. (2014). House dust mite (Der p 10) and crustacean allergic patients may react to food containing Yellow mealworm proteins. *Food and Chemical Toxicology*, *65*, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.12.049>
- Ververis, E., Boué, G., Poulsen, M., Pires, S. M., Niforou, A., Thomsen, S. T., Tesson, V., Federighi, M., & Naska, A. (2022). A systematic review of the nutrient composition, microbiological and toxicological profile of *Acheta domesticus* (house cricket). *Journal of Food Composition and Analysis*, *114*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104859>
- Villaseñor, V. M., Enriquez-Vara, J. N., Urías-Silva, J. E., & Mojica, L. (2021). Edible Insects: Techno-functional Properties Food and Feed Applications and Biological Potential. *Food Reviews International*, *38(sup1)*, 866–892. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1890116>
- Villaseñor, V. M., Navat Enriquez-Vara, J., Urías-Silva, J. E., del Carmen Lugo-Cervantes, E., Luna-Vital, D. A., & Mojica, L. (2022). Mexican grasshopper (*Sphenarium purpurascens*) as source of high protein flour: Techno-functional characterization, and *in silico* and *in vitro* biological potential. *Food Research International*, *162*, 112048. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112048>
- Xue, S., Wang, C., Kim, Y. H. B., Bian, G., Han, M., Xu, X., & Zhou, G. (2020). Application of high-pressure treatment improves the *in vitro* protein digestibility of gel-based meat product. *Food Chemistry*, *306*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125602>
- Yi, L., Lakemond, C. M. M., Sagis, L. M. C., Eisner-Schadler, V., Huis, A. Van, & Boekel, M. A. J. S. V. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, *141(4)*, 3341–3348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.115>





ALIMENTACIÓN, SALUD Y MEDIO AMBIENTE





Teledetección de la turbidez mediante la evaluación de modelos empíricos de predicción en el Lago de Chapala México

Ramiro Vallejo-Rodríguez¹, Leonel Hernández-Mena¹, Jorge del Real-Olvera¹, José de Jesús Díaz-Torres^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Av. Normalistas 800, Colinas de la Normal, CP. 44270, Guadalajara, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: jdiaz@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

aguas continentales, Lago de Chapala, Landsat, Imágenes satelitales, radiancia superficial, teledetección, turbidez

Cambios radiométricos en los detectores del satélite Landsat-8 representan avances significativos en la teledetección aplicada a la calidad del agua. Particularmente, la reflectancia en la región del Infrarrojo Cercano (IRC) implica una reducción el efecto de ruido generado por la fracción de los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos de origen orgánico en las cuantificaciones de turbidez. El análisis de esta banda, en conjunto con la calibración de modelos empíricos basados en información cuasi-sincrónica, permitieron dilucidar la presencia de gradientes horizontales de turbidez que ocurre con normalidad y que exhiben una imagen instantánea de la propia hidrodinámica del Lago de Chapala, la cual está estrechamente relacionada con el espesor diferenciado de la columna de agua y las descargas de sedimentos de los principales tributarios: el río Lerma y el arroyo La Pasión. Las ventajas que ofrece la tecnología satelital de acceso abierto y la implementación de modelos para la interpretación y predicción de propiedades ópticas como la turbidez, representan recursos fundamentales para conocer el estado de equilibrio que guardan los ecosistemas acuáticos como el Lago de Chapala. Estos recursos ofrecen información complementaria y necesaria para llevar a cabo la evaluación continua de propiedades y/o procesos que ocurren en estos ecosistemas de alto valor ambiental.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2), 31-55.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12955345>

Recibido: 14 marzo 2024
Revisado: 9 de mayo 2024
Aceptado: 16 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

El Lago de Chapala, localizado en el occidente de México, es un cuerpo de agua dulce que se caracteriza por su gran dimensión, poca profundidad y con capacidad de regular el clima en su área de influencia (Limón-Macías & Lind, 1990; Lind *et al.*, 1992; Filonov & Tereshchenko, 1999; Lind *et al.*, 2002); debido a esto, el lago cae dentro de la clasificación de ecosistema acuático somero continental de zona intertropical (Chapman, 1996; Chapin *et al.*, 2000; Williams *et al.*, 2004; Oertli *et al.*, 2005). Estos ecosistemas representan ambientes de alta fragilidad debido a que se encuentran en una región extremadamente vulnerable donde el cambio climático y las actividades antropogénicas contribuyen al desarrollo de climas más secos (Bastin *et al.*, 2019). Por lo tanto su preservación es fundamental para enfrentar los graves impactos de la transformación ambiental que ocurre en grandes regiones continentales (Wetzel, 2001).

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como organismo descentralizado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es la instancia que lleva a cabo el monitoreo de la calidad de aguas superficiales y subterráneas del país. Hasta 2022, la CONAGUA contaba con un sistema de monitoreo constituida por 2595 sitios de muestreo, de los cuales 1723 (66.4% del total) estaban dispuestas para el monitoreo de cuerpos de aguas superficiales (CONAGUA, 2024). La información de este sistema de monitoreo se emplea para medir y determinar el grado de contaminación de ríos y lagos mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) de la CONAGUA, el semáforo de calidad del agua o indicadores específicos como la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) o los sólidos suspendidos totales (SST) que en conjunto permiten evaluar el impacto de las descargas de aguas residuales municipales, industriales y agrícolas. El sistema de monitoreo de la CONAGUA en el Lago de Chapala consta de 35 sitios de muestreo, comprende un total de 921 registros con información de casi 100 parámetros físicos, químicos y biológicos medidos entre los años 2000 y 2018. Algunos de estos parámetros tienen propiedades ópticas (interacción con la luz natural), lo que permite su estimación a través de métodos y técnicas convencionales como la percepción remota basada en la medición de sensores pasivos montados en plataformas satelitales (p. e. Landsat o Sentinel). Entre los parámetros ópticamente dispuestos, están los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), clorofila-a (Chl-a), la transparencia o la turbidez (Matthews, 2011).

La turbidez es una propiedad física que resulta de la dispersión y absorción de luz natural causada por el material particulado en el agua. La turbidez se produce por la presencia de material particulado en suspensión, este material regularmente



está constituido por limos, arcillas, partículas finas de materia orgánica e inorgánica, compuestos orgánicos solubles, plancton u otros organismos microscópicos (Chapman, 1996; Milojkovic *et al.*, 2019). La turbidez es de especial interés debido a que cambios en sus cantidades pueden inducir sustanciales alteraciones en un cuerpo de agua. El incremento de la turbidez puede aumentar la temperatura del agua ante la absorción de calor por parte de las partículas suspendidas, reduciendo eventualmente la concentración de oxígeno disuelto (USEPA, 1997). La misma USEPA indica que una mayor turbidez también reduce la cantidad de luz que penetra en el agua, reduciendo el proceso de fotosíntesis y la producción de oxígeno disuelto. Además la USEPA señala que debido a que la turbidez es una propiedad que indica de forma indirecta los efectos del material en suspensión, esta propiedad eventualmente puede ser empleada como criterio para la evaluación de efectos sobre la salud de la fauna de ríos o lagos. Por ejemplo, el material en suspensión pueden obstruir las branquias de los peces, lo que reduce su resistencia a enfermedades, reduciendo sus tasas de crecimiento y afectando el desarrollo de huevos y larvas. A medida que las partículas se asientan, pueden cubrir el fondo del arroyo, especialmente en aguas más lentas, y asfixiar los huevos de peces y los macroinvertebrados bentónicos. Por otra parte, los niveles altos de turbidez pueden proteger a los microorganismos de procesos de desinfección, favorecer la proliferación de bacterias e incrementar la demanda de cloro. De esta manera, la presencia de turbiedad en el agua implica un riesgo microbiológico en las poblaciones humanas (WHO, 2017).

La turbidez en el Lago de Chapala es uno de los parámetros de interés científico, Limón-Macías & Lind (1990) señalan un importante incremento de la turbidez asociada al incremento de sólidos disueltos y la resuspensión de sedimento inorgánico que se generó como efecto de la reducción del volumen de agua que entraba al lago y al incremento de la evapotranspiración que comenzó durante la década de los años 80's, esto condujo a la alteración de la dinámica y procesos ecológicos dentro del lago. Debido a que la turbidez causada por material inorgánico es un factor determinante en atenuación de la luz natural que pasa a través de la columna de agua, se ha demostrado que es un factor que regula la producción primaria del lago y la síntesis de nutrientes provenientes de actividades antropogénicas (Davalos *et al.*, 1989; Lind *et al.*, 1992; Lind *et al.*, 1997). Otro factor que induce la turbidez es el crecimiento de poblaciones de algas y su actividad fotosintética, la cual también se ha medido a través de clorofila-a (Chl-a) en el lago, el crecimiento atípico de estos microorganismo eventualmente conducen a la eutrofización de cuerpos de agua (Chapman, 1996). Históricamente, la Chl-a en el Lago de Chapala ha presentado eventos con altas concentraciones de Chl-a, los cuales han llegado hasta los 171 mg m⁻³ entre 1974 y 1998 (Rodríguez-Padilla, 2000), o



hasta 218.4 mg m⁻³ según los registros de la CONAGUA para el periodo 2012-2018. A partir del recuento de registros individuales de este parámetro de calidad del agua, se sabe que solo un 10% de los registros excede los 30 mg m⁻³, límite por encima del cual las mediciones de Chl-a se presentan de forma atípica. No obstante la ocurrencia de eventos atípicos o extraordinarios, las concentraciones de Chl-a se mantienen bajas (4.5 y 12.1 mg m⁻³) (Lind *et al.*, 1992; Rodríguez-Padilla, 2000; Schalles, 2006; Membrillo-Abad *et al.*, 2016).

Cerca del 60% del agua de Chapala abastece a la población del Área Metropolitana de Guadalajara, su uso demanda un adecuado nivel de calidad para el consumo humano. El análisis estadístico de la información de COANGUA para el periodo 2000-2018 (Tabla 1) muestra que los valores medios de turbidez en el Lago de Chapala normalmente están muy por encima de las cantidades recomendadas por la normatividad mexicana en materia de calidad del agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-2021), por lo tanto, la turbidez es una de las propiedades a monitorear en el lago.

Tabla 1. Estadística descriptiva de parámetros de la calidad del agua en el Lago de Chapala, información agrupada por sitio para el periodo 2000-2018

Parámetro	No. de Registros	Rango	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana	Desv. Std.	Coef. de variación	Error Std.
OD	35	20.520	65.400	85.920	78.583	78.840	5.2	6.6%	0.9
CF	10	1422.000	88.000	1510.000	739.800	775.000	574.7	77.7%	181.8
pH	35	0.807	8.243	9.050	8.566	8.468	0.2	2.9%	0.0
DBO5	35	5.253	2.754	8.008	4.288	4.052	1.2	27.5%	0.2
DT	35	2.565	-2.715	-0.150	-1.475	-1.437	0.7	-44.8%	0.1
P	35	0.253	0.503	0.757	0.596	0.571	0.1	12.1%	0.0
N	35	1.075	0.032	1.107	0.311	0.246	0.3	83.1%	0.0
T	35	72.592	21.308	93.899	35.127	26.496	19.3	54.9%	3.3
ST	22	163.363	569.857	733.220	600.713	596.220	33.1	5.5%	7.1

Oxígeno Disuelto, OD (% de saturación); Coliformes fecales, CF (UFC/100 ml); pH; Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO5 (mg l⁻¹); Diferencia de temperatura entre el agua y ambiente, DT (° C); Fosfatos, P (mg l⁻¹); Nitratos, N (mg l⁻¹); Turbidez (UNT); Sólidos Totales, ST (mg l⁻¹).

La recurrente medición de turbidez es un criterio de decisión para realizar mediciones sistemáticas de otros parámetros potencialmente contaminantes en cuerpos de agua donde previamente no se han detectado cambios significativos en la calidad del agua o en donde no se cuenta con un programa de monitoreo formal. En este sentido, la percepción remota como una herramienta de análisis espacial ofrece la oportunidad de evaluar propiedades de calidad del agua como la turbidez, basada en observaciones previas para la calibración de modelos de predicción. La información que se obtiene de plataformas satelitales es un recurso fundamental para el desarrollo de estos modelos y consecuentemente para entender los cambios espaciales



y temporales de esas propiedades, así como sus efectos en el mediano plazo. Este tipo de enfoque y sus subproductos tecnológicos, permiten comprender con mayor certeza la dinámica de los ecosistemas, la interacción endógena de sus componentes y los efectos de los factores exógenos. Este trabajo tiene como objetivo evaluar la turbidez del agua causada por las altas concentraciones de material en suspensión. Las imágenes satelitales de la plataforma Landsat, junto con el desarrollo de un modelo empírico, fueron utilizadas para conocer el comportamiento espacial de la turbidez al interior del Lago de Chapala.

Área de estudio

El Lago de Chapala es el más grande de México, tiene una superficie de $\sim 1100 \text{ km}^2$, una longitud de 75 km y ancho medio de 5.5 km (Figura 1). Tienen una capacidad máxima de $\sim 7900 \text{ Mm}^3$ en su cota de máxima altura (1,523.8 msnm) y una profundidad media de 4.5 y 8 m en su parte más profunda (Limón-Macías & Lind, 1990; Lind *et al.*, 1992).

El río Lerma y el arroyo La Pasión representan la principal fuente de sedimentos predominantemente inorgánicos y de la turbidez del Lago de Chapala (Lind *et al.*, 1992; de Anda *et al.*, 2004). El río Lerma forma parte de uno de los principales sistemas de cuencas del país, cuenta con una superficie de $47\,116 \text{ km}^2$ y un escurrimiento superficial medio anual de 4742 Hm^3 (CONAGUA, 2016). El río Lerma transporta una gran cantidad de sólidos generados por procesos erosivos, provocados principalmente por un mal manejo del recurso suelo (Aparicio, 2001; de León-Mojarro, 2001). El río también transporta contaminantes desde los pueblos aguas arriba hacia el lago debido a las actividades agrícolas, ganaderas e industriales; muchos de estos efluentes no son tratados y constituyen una amenaza potencial para el ecosistema del lago y aguas abajo (Hansen & Afferden, 2001; Jay & Ford, 2001).

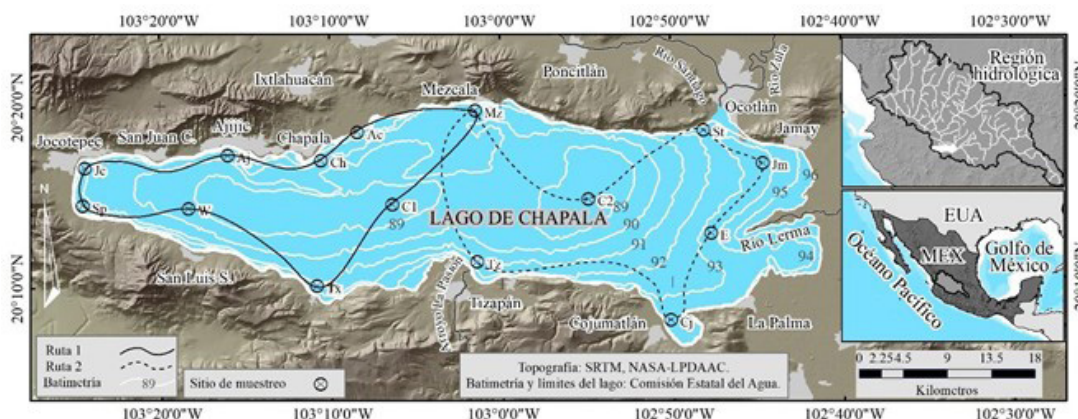


Figura 1. Mapa del Lago de Chapala. Abreviaciones: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); National Aeronautics and Space Administration (NASA); y The Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC)



Materiales y métodos

Hay una gran variedad de modelos de predicción basados en la percepción remota que están enfocados a medir y evaluar diferentes elementos que conforman a los ecosistemas acuáticos (Matthews, 2011), y el desarrollo de modelos empíricos representa una forma rápida y práctica para evaluar las condiciones de calidad del agua respecto a uno o varios elementos que afectan el equilibrio de estos ecosistemas. Estos modelos se construyen considerando la alta capacidad del agua por absorber la luz natural y las propiedades ópticas de reflexión de algunos componentes disueltos en el agua o en suspensión. La imagen satelital representa una fuente de datos básica para evaluar instantáneamente la calidad de agua de cuerpos de agua de gran extensión. Estos datos derivan de sistemas sensores calibrados para detectar la energía reflejada en las diferentes regiones del espectro electromagnético (Visible, VIS; Infrarrojo cercano, IRC; Infrarrojo de onda corta, IRS), y el análisis por separado o complementario de estos datos es lo que permite tener una buena aproximación sobre la detección de los componentes del agua y su comportamiento dentro del propio cuerpo de agua.

Información de campo

El desarrollo de modelos empíricos requiere datos de campo y mediciones sincronizadas con la hora de paso del satélite. En este sentido, dos campañas de muestreo se llevaron a cabo para obtener parámetros de calidad del agua en 15 sitios del Lago de Chapala (Tabla 2). Dos brigadas cubrieron simultáneamente dos rutas para medir las propiedades del agua, especialmente la información sobre sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez fue analizada para el caso de este estudio (Figura 1). El primer muestreo se realizó durante la temporada de lluvias de 2016 (6 de septiembre), el segundo se llevó a cabo durante la temporada de estiaje cálida del siguiente año (24 de abril de 2017). Estos levantamientos tuvieron una duración aproximada de 5 y 7 h respectivamente, periodo dentro del cual normalmente pasa el satélite sobre el área de estudio, esto es aproximadamente a las 11:18 a. m. hora local.

Todas las muestras se tomaron a 1 m de profundidad a partir de la superficie de la columna de agua. Las muestras de agua se almacenaron en botellas ámbar de 1 litro previamente acondicionadas en laboratorio. Las muestras se aislaron a una temperatura <4 °C para preservar sin cambios significativos las propiedades del agua. Las muestras se midieron por triplicado y se tomó el valor medio de cada parámetro en todos los sitios. Los TSS se determinaron en laboratorio de acuerdo al método estandarizado para el análisis del agua descrito en la sección 2540-D de la APHA (APHA, 2005). La turbidez se determinó in situ en términos de Unidades Nefelo-



métricas de Turbidez (UNTs); esto mediante un turbidímetro (Hach 2100AN-SI) que mide la dispersión de la luz en el intervalo de 860 ± 10 nm bajo los estándares la norma ISO 7027-1: 2016.

Tabla 2. Mediciones de turbidez y Sólidos suspendidos totales (TSS) en el Lago de Chapala

Sitio	Localidad	Abreviación	Septiembre 6, 2016 (Temporada húmeda, lluvias)			Abril 24, 2017 (Temporada seca cálida)		
			Hora local	Turbidez (UNT)	SST (mg l ⁻¹)	Hora local	Turbidez (UNT)	SST (mg l ⁻¹)
0	Acueducto	Ac	12:13:42 p.m.	36.6	168	11:24:00 a.m.	21.9	171
3	Chapala	Ch	12:24:20 p.m.	31.2	170	11:50:00 a.m.	25.3	178
4	Ajjic	Aj	12:44:35 p.m.	29.4	168	12:29:39 p.m.	28.8	202
5	Jocotepec	Jc	01:27:19 p.m.	28.0	175	13:24:09 p.m.	32.2	216
6	San pedro	Sp	01:51:35 p.m.	28.8	175	01:31:19 p.m.	28.1	184
7	LCH W	W	02:27:58 p.m.	22.4	169	02:07:17 p.m.	23.8	211
8	Tuxcueca	Tx	03:09:59 p.m.	19.9	157	02:46:43 p.m.	27.9	186
16	LCH C1	C1	03:45:48 p.m.	26.1	135	03:31:01 p.m.	22.6	222
9	Tizapán	Tz	03:25:38 p.m.	32.9	308	05:10:08 p.m.	29.0	248
10	Cojumatlán	Cj	02:33:11 p.m.	33.4	175	03:30:38 p.m.	48.3	248
11	LCH C2	C2	11:34:33 a.m.	33.6	303	12:13:58 p.m.	24.7	218
13	LCH E	E	01:29:45 p.m.	163.0	342	02:38:33 p.m.	77.3	306
14	Jamay	Jm	12:51:42 p.m.	65.9	232	01:51:13 p.m.	94.1	237
15	Mezcala	Mz	10:50:09 a.m.	30.7	214	06:01:01 p.m.	18.9	251
17	Santiago	St	12:12:11 p.m.	43.1	262	12:59:26 p.m.	45.5	251

Sitios localizados en el lado este (sombreados). Abreviaciones: Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT); Sólidos Suspendidos Total (SST); Lago de Chapala (LCH); Lado Oeste (W); Centro (C); Lado Este (E).

Los datos de turbidez y SST de las dos campañas se analizaron en conjunto para determinar el tipo de distribución estadística de cada parámetro. El comportamiento estadístico no normal de estos datos condujo a la implementación de la prueba U de Mann-Whitney para comparar conjuntos de datos entre temporadas, estaciones y zonas del lago. Mientras que la prueba r de Spearman permitió determinar el grado de asociación entre estas variables. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con una significancia de $p < 0.05$.

Imagen satelital

Varias imágenes Landsat-8 con resolución espacial de 30 m² se buscaron para cada fecha de muestreo; dos de estas se emplearon para construir los modelos para cada una de las temporadas analizadas, las otras fueron utilizadas para evaluar los modelos generados previamente (Tabla 3). Una imagen tuvo coincidencia temporal para analizar la turbidez medida el 6 de septiembre 2016) (LC08-L1TP-029046-20160906-



01-T1-SR), la segunda imagen presenta un desfase temporal de 6 días previos al muestreo realizado el 24 de abril de 2017 (www.earthexplorer.usgs.gov). Estas corresponden a los productos de la Colección 1, Nivel 2 que contienen información de radiancia a nivel de superficie generada por el Código de Reflectancia Superficial Landsat (LaSRC, por sus siglas en inglés) (USGS, 2019). Estos productos derivan de la corrección de un conjunto de efectos ópticos relacionados con propiedades de la atmósfera, la topografía y las relaciones geométricas entre el Sol, la superficie de la Tierra y el ángulo de observación del sensor (Vermote *et al.*, 2016), lo cual permite contar con productos de mejor calidad incrementando la coherencia y la comparabilidad multi-temporal entre las imágenes (USGS, 2015). Además, este satélite presenta mejoras respecto a su resolución espectral que favorecen el estudio de la turbidez en aguas continentales. Particularmente la reducción del ancho de banda en el IRC, el cual pasó de 772-898 nm en las imágenes de los anteriores sistemas sensores de Landsat (TM5 y ETM+7) a 851-879 nm en Landsat 8 (USGS, 2019). Este cambio implica grandes ventajas en la teledetección de turbidez debido que se ajusta al rango de la medición estándar de la norma ISO 7027-1: 2016.

Tabla 3. Lista de imágenes empleadas para el análisis de la turbidez

Imagen Landsat-8	Fecha de la imagen	Fecha del levantamiento
LC08-029046-20160906-01T1*	septiembre 6, 2016	septiembre 6, 2016
LC08-029046-20170418-01T1*	abril 18, 2017	abril 24, 2017
LC08-029046-20170504-01T1	mayo 4, 2017	
LC08-029046-20170909-01T1	septiembre 9, 2017	

*Imágenes empleadas para la calibración de los modelos empíricos de predicción. Las otras imágenes se emplearon para la evaluar la capacidad de predicción de los modelos empíricos.

La información de radiancia superficial codificada en números digitales (formato comprimido de la radiancia) correspondiente a estas imágenes fue calibrada conforme a la metodología expuesta en la guía de usuario de este producto (USGS, 2019) para conocer la parte proporcional de la energía que refleja (Reflectancia) la superficie del agua en el Lago de Chapala. Posteriormente, un cociente de bandas convencional tal como la relación del espectros infrarrojo de onda corta (IRS) sobre la fracción azul del visible (IRS-2/Azul) se utilizó para aislar la respuesta espectral del agua y suprimir superficies diferentes al agua. El resultado de este cociente indica que cualquier valor menor que la unidad se clasifica como superficie cubierta por agua, esta relación se explica por la alta absorbancia del agua en el IRS-2 que contrasta con la alta reflectancia que ocurre en el espectro visible, un comportamiento espectral propio del agua.

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que los cuerpos de agua superficiales presentan aspectos particulares que complican su análisis. El efecto de destello



solar (Glint) es uno de los efectos más importantes a considerar como parte de la reflexión especular proveniente de la parte superior de la interfaz aire-agua, la cual llega al detector satelital afectando principalmente la respuesta del espectro visible (Kay *et al.*, 2009). Este efecto es considerado como uno de los mayores factores que afectan la calidad y precisión de la respuesta óptica del agua después de la interferencia atmosférica. Un método estadístico propuesto por Lyzenga *et al.* (2006) se implementó para reducir la interferencia por destello que se manifiesta con mayor intensidad en la región del VIS. Este método se basa en la respuesta del IRC asumiendo que el agua tiene una alta capacidad de absorción de energía en esta región, lo que produce una insignificante dispersión de luz que proviene de diferentes niveles de la columna de agua o la señal del fondo. No obstante las ventajas descritas del IRC, estudios recientes demuestran que la respuesta de la radiancia de la región del IRS-2 ofrece mejores resultados que el IRC (Wang & Shi, 2007; Shi & Wang, 2009; Lobo *et al.*, 2015), por lo tanto, esta banda fue implementada para llevar a cabo la corrección por destello solar en el espectro visible y también para mejorar la respuesta espectral del IRC.

Modelo Empírico

Los modelos empíricos para la estimación de la turbidez están basados en el análisis de correlación entre la turbidez y la reflectancia. Las coordenadas de los 15 sitios de medición de la turbidez se utilizaron para obtener el dato de reflectancia de las imágenes, con esta información se calibró el modelo de predicción. La turbidez de campo se empleó como la variable independiente para la calibración del modelo, mientras que la reflectancia fue definida como la variable dependiente. Una función polinomial de segundo grado se obtuvo para la temporada de lluvias de 2016 y otra para la temporada de estiaje-seco de 2017. La turbidez estimada a partir de los datos satelitales se obtuvo mediante la expresión de la ecuación cuadrática donde se resuelven los valores de la variable independiente con base al coeficiente cuadrático, el coeficiente lineal y el termino independiente de cada función polinomial.

El nivel de predicción de los modelos empíricos se estimó a partir de una correlación lineal simple entre la turbidez medida y estimada para las dos imágenes que permitieron la calibración del modelo. Estos modelos también se pusieron a prueba sobre otras imágenes adquiridas en fechas cercanas a las imágenes que se emplearon para la calibración de cada modelo (Tabla 3). Las mediciones de turbidez de este estudio, así como aquellas que realizó el sistema de monitoreo de la Comisión Nacional del Agua en 34 sitios dentro del lago se tomaron en cuenta para evaluar el nivel de certidumbre de la respuesta de cada modelo de predicción. Tanto



el valor de turbidez medido en campo como el estimado a partir de los modelos se empelaron para calcular el error absoluto medio (EAM), el error típico (Et) y el error cuadrático medio (ECM) de cada imagen analizada.

Análisis de resultados y discusión

Relaciones entre Sólidos Suspendidos y Turbidez

A partir de la información global de las dos temporadas, se observó que la turbidez varía en un rango de 18.9 a 163.0 UNT (Tabla 2), estas mediciones fueron consistentes con los valores de estudios previos (Lind *et al.*, 1997; Otto *et al.*, 2020). El análisis de varianza (ANOVA) basado en las medianas de turbidez indica que no existen diferencias estadísticas entre temporadas ($p = 0.290$); sin embargo, la turbidez su presentó diferencias según la localización dentro del lago ($p < 0,001$), las cuales fueron evidentes durante la temporada de lluvias ($p < 0,007$) (Tabla 4). Por otro lado, los SST observados en ambas temporadas oscilan entre 135 y 342 mg l-1 (Tabla 2), concentraciones semejantes a las reportadas 8 y 20 años atrás (de Anda *et al.*, 2004; Torres-Vera, 2023). Los SST siguen un patrón semejante al de la turbidez, sus concentraciones estadísticamente son similares y sin diferencias significativas ($p = 0.130$). Espacialmente los SST son más altos en el sector este del lago, esto es independientemente de la temporada del año ($p = 0.000$) (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencias estacionales y espaciales de la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST)

Temporada/Sector del lago	Turbidez NTU	SST (mg l ⁻¹)
Lluvias (LL)	41.7±34.0	210.3±62.1
Estiaje cálido (EC)	36.6±21.0	222.0±34.8
Oeste-LL	28.0±05.1	168.9±05.9
Este-LL	53.6±42.9	246.5±66.2
Oeste-EC	26.9±03.2	192.7±16.1
Este-EC	45.1±25.1	247.7±25.1

Ver la Tabla 2 para identificar los sitios ubicados en los dos sectores del Lago de Chapala.

Las similitudes entre la variación de la turbidez y los SST entre estaciones o áreas del lago fueron evaluadas y corroboradas a partir del nivel de asociación determinado por la prueba r de Spearman ($r = 0.51$, $p < 0.05$). Estos resultados indican que existe una importante relación entre las concentraciones de los SST y turbidez que nos permitió confirmar la relación entre ambas, siendo esta última una respuesta directa de las concentraciones de SST vertidos al lago.

Los SST corresponden a una mezcla de compuestos que tienen origen distinto; en términos generales, estos se clasifican según composición en orgánicos e inorgá-

nicos. En este sentido, la teledetección permite identificar estas diferencias debido a que la composición de estos constituyentes puede discriminarse con cierta facilidad a partir de la firma espectral de cada subconjunto. Los SST de origen orgánico tienden a expresarse en la región del espectro VIS, mientras que la fracción inorgánica se caracteriza con mayor facilidad en la región del IRC. Tomando en cuenta estas propiedades, la estimación de la turbidez estuvo basada en el análisis de esta última región del espectro.

Mejoras espectrales

La corrección de la imagen por efecto de destello solar basada en la banda IRS-2 introdujo mejoras sobre la respuesta espectral de IRC y el visible (VIS), debido a que naturalmente presenta un coeficiente de absorción más alto en la región del IRS-2 (2110-2290 nm). En términos generales la corrección disminuyó el brillo de la imagen que produce la superficie de agua, lo cual se manifestó en un ajuste medio del $\sim 3\%$ en los valores de las medianas de reflectancia (1.2 a 4.2%) (Figura 2a). La implementación de la metodología propuesta por Lyzenga *et al.* (2006) produjo una redistribución de los histogramas, ajustando la disposición de una frecuencia multimodal de la reflectancia a una distribución cuasi normal (Figura 2b).

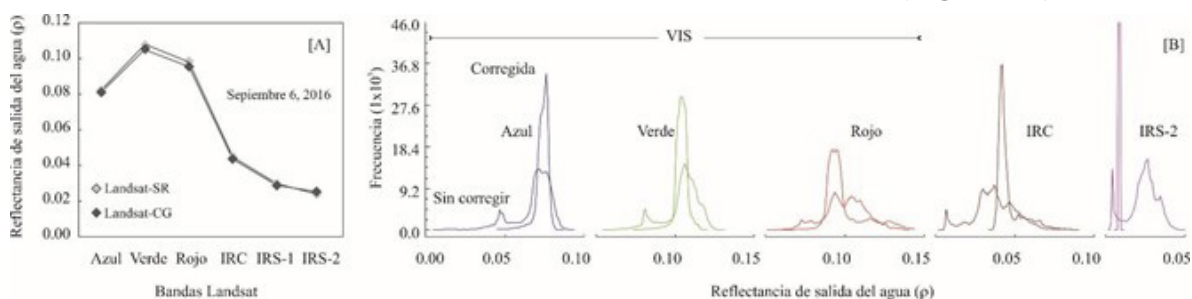


Figura 2. Ajuste del histograma de reflectancia superficial (SR) a partir de efecto de la corrección por efecto de destello solar (CG) del Lago de Chapala. A) Histograma generalizado con los valores de las medianas de reflectancia por banda. B) Histogramas individuales por banda antes y después de la corrección por destello solar. Abreviaciones: Región del espectro visible, VIS; Infrarrojo cercano, IRC; Infrarrojo de onda corta, IRS

Esta sustracción del 1.2 al 4.2% del ruido en la reflectancia por efecto de destello aporta directamente a la reducción de la incertidumbre asociada a la calibración del modelo empírico de predicción, y particularmente la respuesta del IRC es la región donde el porcentaje de ajuste con relación al rango de magnitudes del propio IRC es uno de los mayores (3.1%). Por otra parte, el ajuste de los histogramas de cada banda en el espectro visible (Rojo, Verde, Azul: RGB) contribuyó a mejoras visuales que permitieron atenuar ese efecto de destello que se observa previo a su corrección (Figura 3a). La corrección resalta patrones lineales de flujos del agua, así como lo que aparece como plumas de sedimentos provenientes tanto de los principales



tributarios del lago (Lerma y La Pasión) así como la desembocadura del lago (río Santiago) (Figura 3b).

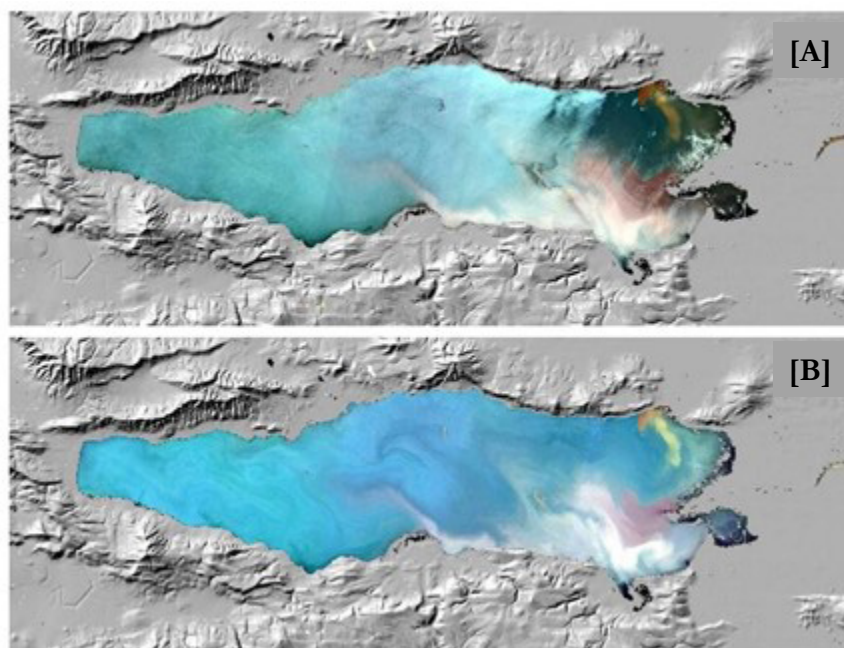


Figura 3. Comparación de la respuesta espectral del Lago de Chapala, composición de bandas en color real (Red-Green-Blue colors, RGB:321). A) Datos de reflectancia superficial generados por el LaSRC. B) Datos de la de reflectancia superficial corregidos por efecto de destello solar (Glint)

Modelo de predicción de la turbidez

Los modelos empíricos de predicción se calibraron con base en las muestras de turbidez de los 15 sitios en campo (Tabla 1) y la respuesta espectral del IRC corregida por efecto de destello para cada temporada del año analizada: lluvias (imagen del 6 de septiembre de 2016) y cálida seca (imagen del 18 de abril de 2017). El análisis de correlación asociado a las funciones polinomiales desarrolladas para el modelo de cada temporada muestra que la reflectancia del IRC explica más del 70% de la variabilidad de la turbidez medida en campo (Figura 4).

Tomando en consideración este grado de correlación, los coeficientes cuadráticos, lineales y los términos independientes de cada función se sustituyeron en la expresión polinomial de segundo grado para resolver los valores desconocidos de la variable dependiente, es decir, el valor estimado de turbidez; las ecuaciones 1 y 2 representan los modelos empíricos de predicción de la turbidez para temporada de primavera y para la transición verano-otoño, respectivamente.

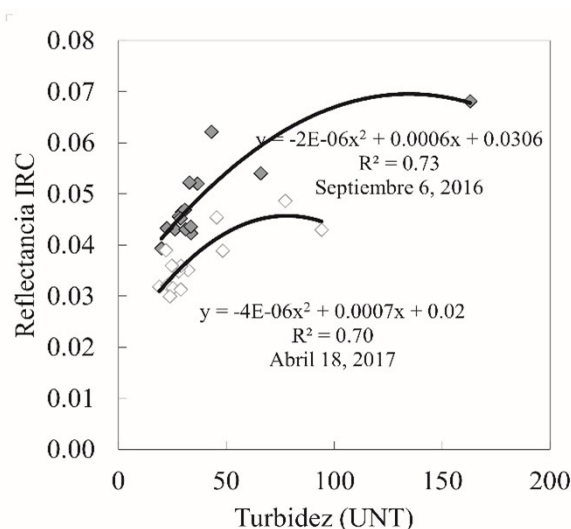


Figura 4. Construcción de los modelos empíricos para la predicción de la turbidez mediante funciones polinomiales de regresión basados en turbidez de campo y la reflectancia obtenida de imágenes Landsat.

$$Turbidez_{primavera} = \frac{-(0.0007) + \sqrt{0.0007^2 - 4(-0.000004)(\rho_{IRC} - 0.02)}}{2(-0.000004)} \quad (Ec. 1)$$

$$Turbidez_{verano-otoño} = \frac{-(0.0006) + \sqrt{0.0006^2 - 4(-0.000002)(\rho_{IRC} - 0.0306)}}{2(-0.000002)} \quad (Ec. 2)$$

Estas ecuaciones se implementaron en las operaciones de análisis espacial para estimar la turbidez en continuo a través de la respuesta espectral del IRC (860 ± 10 nm) correspondiente a las imágenes empleadas para la calibración de los modelos y las imágenes que se usaron para la validación (Tabla 3). La turbidez media para el verano-otoño se estimó entre 31 y 46 UNT con valores máximos de hasta 150 UNT. La turbidez media para la temporada de primavera osciló alrededor de 12 y 32 UNT con valores máximos de entre 87 y 150 UNT (Figura 5). El sector oriental y las orillas del lago fueron las zonas donde los modelos determinaron la mayor turbidez. Estas proyecciones espaciales coinciden con la distribución horizontal de los valores medios y máximos de la turbidez estimada a través de los análisis geoestadísticos basado en mediciones de la CONAGUA (Otto *et al.*, 2020), donde se demuestra que en estas áreas normalmente se presentan valores de turbidez media y máxima superiores a las 35 y 79 UNT, respectivamente.

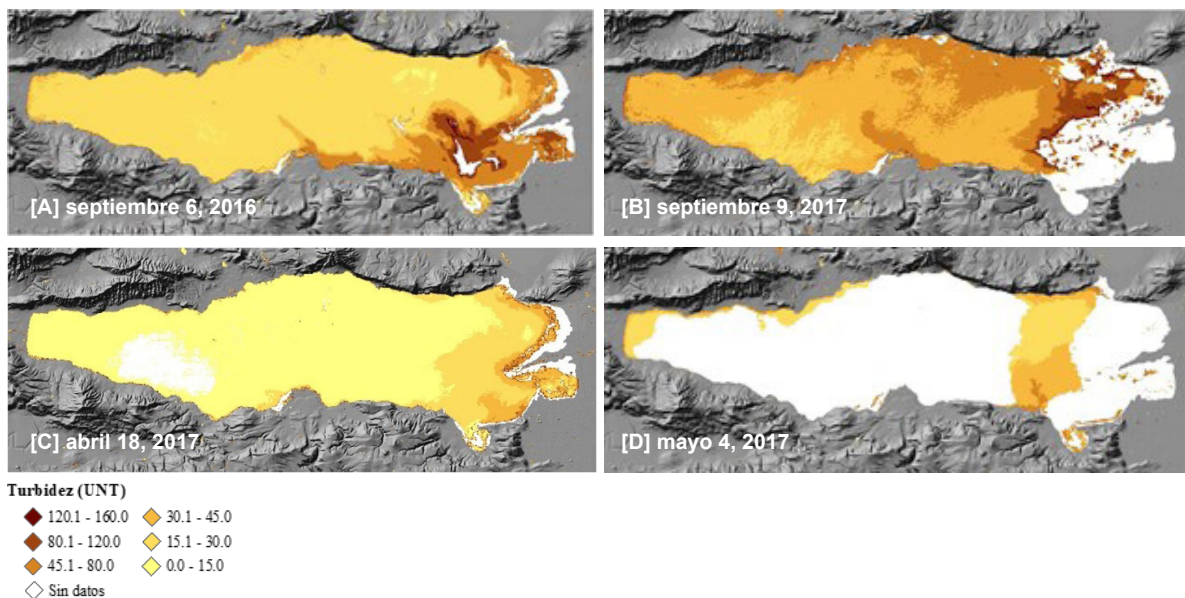


Figura 5. Estimación de la turbidez en el Lago de Chapala a partir de imagen satelital y los dos modelos empíricos. Turbidez estimada mediante el modelo de verano-otoño (A y B), y el modelo de primavera (C y D).

Validación de la respuesta de salida

La evaluación de los modelos de predicción se llevó a cabo considerando la mediciones de campo de este estudio, así como la información de los 34 sitios de monitoreo dentro del Lago de Chapala que administra la CONAGUA. En cuanto a la información de reflectancia, el área efectiva de análisis de dos imágenes se empleó para esta evaluación, una tomada el 4 de mayo de 2017 y otra el 9 de septiembre de 2017. El área efectiva de las imágenes corresponde a la superficie dispuesta para su análisis, excluyendo aquella que no estuvo expuesta a los detectores satelitales debido a la cobertura nubosa, la sombra de nubes o partes del lago donde la calidad de la imagen (pixel) está comprometida por la alta densidad de aerosoles. Bajo estos criterios se encontró que el área dispuesta para el análisis permitió la comparación de reflectancia con 4 sitios de este estudio y 7 sitios de la CONAGUA para evaluar el nivel de predicción del modelo en primavera, mientras que el modelo de predicción de verano-otoño se pudo evaluar en 31 sitios de la CONAGUA. La evaluación de la respuesta de salida de cada modelo fue evaluada a partir de una correlación lineal entre la turbidez medida y la estimada, tanto para la turbidez estimada a partir de las imágenes empleadas para la calibración, así como la estimada a partir de las imágenes empleadas para la validación de los modelos (Tabla 5).

**Tabla 5.** Lista de imágenes empleadas para el análisis de la turbidez

Fecha de la Imagen	Fecha del levantamiento	Núm. de muestras (n)	Temporada	R2	p-value	EAM	Et	ECM
Calibración del modelo (Función polinomial)								
Sep 6, 2016	Sep 6, 2016	15 sitios*	Verano-Otoño	0.73	0.0004	0.003	0.004	53.754
Abril 18, 2017	Abril 24, 2017	15 sitios*	Primavera	0.70	0.0007	0.002	0.003	42.143
Evaluación de la predicción de los modelos (regresión simple)								
Sep 6, 2016	Sep 6, 2016	15 sitios*	Verano-Otoño	0.71	0.0001	6.914	11.106	21.607
Abril 18, 2017	Abril 24, 2017	15 sitios*	Primavera	0.61	0.0006	6.294	8.981	15.062
Mayo 4, 2017	Abril 24, 2017	4 sitios*	Primavera	0.97	0.0129	1.065	1.693	36.978
Mayo 4, 2017	Prom. Primavera†	7 sitios**	Primavera	0.75	0.0124	3.053	4.305	2.828
Mayo 4, 2017	Mayo 2-7, 2017	7 sitios**	Primavera	0.84	0.0036	2.422	3.402	6.442
Sep 9, 2017	Prom. Agosto-Sep†	31 sitios**	Verano-Otoño	0.47	0.0001	9.258	11.915	30.272
Sep 9, 2017	Agosto 28/Sep 6	31 sitios**	Verano-Otoño	0.48	0.0001	8.966	11.809	34.298

Error absoluto medio (EAM); Error típico (Et); Error cuadrático medio (ECM). Todos expresados en términos de Unidades Nefelométricas de turbidez (UNT). †Las fechas de levantamiento donde se manifiestan promedios, las estimaciones corresponden a los valores medios estimados en el periodo 2000-2018. *Información de turbidez tomada de este trabajo. **Información tomada del sistema de monitoreo de la CONAGUA.

En el caso del análisis sobre las imágenes para la calibración, la información de ambas variables registrada en los 15 sitios se utilizó para realizar esta evaluación. Los resultados indican que el modelo para la temporada verano-otoño presentó una correlación moderada a fuerte ($R=0.84$) a través del cual se encontró que el modelo explica el 71.1% de la variabilidad medida en campo en los 15 sitios. El Et de este modelo se estimó en 11.1 UNT y un ECM de 21.6 UNT. Mientras que el modelo para la temporada de primavera presentó una correlación moderada ($R=0.78$) que explica el 61.1% de la variabilidad medida en los 15 sitios de muestreo de este estudio; Et de este modelo se estimó en 9.0 UNT y un ECM de 15.1 UNT.

La evaluación del modelo de predicción para la primavera sobre una imagen (4 de mayo de 2017) cercana a la fecha de calibración muestra que la turbidez estimada presenta niveles de correlación lineal moderada a fuerte ($R = 0.86$ a 0.98) con valores de Et que oscilan entre 1.7 y 4.3 UNT y valores de ECM entre 2.8 y 36.9 UNT (Tabla 5). Estos explican el 97.4% de la variabilidad de la turbidez medida en 4 de los 15 sitios de este estudio, el 84.1% de la variabilidad medida en 7 sitios de la CONAGUA, así como un 74.5% de la variabilidad de la turbidez media observada en la temporada de primavera durante el periodo 2000-2018 en esos mismos 7 sitios. El modelo de predicción para el verano-otoño se evaluó a partir de una imagen correspondiente a dicha temporada, pero del año posterior a la calibración del modelo (9 de septiembre de 2017). La turbidez estimada presenta niveles de correlación lineal débil a moderada ($R = 0.68$ a 0.69) y valores de Et (11.8 y 11.9 UNT) y ECM (30.2 y 34.3 UNT) mayores a los estimados en la mayoría de los casos para la temporada primavera. Estos datos muestran que el modelo de predicción



para esta temporada explica el 47.5% de la variabilidad de la turbidez medida entre el 28 de agosto y el 6 de septiembre de 2017 en 31 sitios de la CONAGUA, así como el 46.6% de la variabilidad de la turbidez media medida en los meses de agosto y septiembre durante el periodo 2000-2018 en los mismos sitios de la CONAGUA.

Las estimaciones de estos modelos son aceptables si consideramos que se construyeron con una cantidad muy pequeña de datos en comparación con la gran dimensión e hidrodinámica del propio cuerpo de agua. Encontramos que estos modelos explican con una buena aproximación, la variabilidad de nuestras mediciones de turbidez o las mediciones realizadas por la CONAGUA, tanto para mediciones de campo con desfases temporales respecto a la fecha de toma de la imagen en el orden de horas (quasi-sincrónicas) (este estudio: septiembre 6, 2016), días (este estudio: abril 24, 2017), o semanas (CONAGUA: mayo 2 al 7, 2017); y correspondientes a mediciones medias estimadas por estación o meses de referencias (CONAGUA: promedios para el periodo 2000-2018) (Tabla 5).

Implicaciones

Los modelos empíricos dependen de mediciones simultáneas o cuasi-síncronas con retardos temporales mínimos respecto a la hora de paso del satélite. En este estudio las diferencias temporales entre el muestreo y el paso del satélite fueron de hasta 4 h en la temporada verano-otoño. Un desfase temporal de varios días podría ser manejable en el desarrollo de un modelo si la dinámica del cuerpo de agua así lo permite (un medio de baja energía) y si se cuenta con una gran cantidad de datos respecto a su frecuencia temporal y espacial (Arias-Rodríguez *et al.*, 2021). Varios estudios sugieren y resuelven esta relación temporal (Harrington *et al.*, 1992; Vincent *et al.*, 2004; Kallio *et al.*, 2008); mientras que otros admiten diferencias de ± 1 día (Kloiber *et al.*, 2002; Hicks *et al.*, 2013; Barrett & Frazier, 2016). Cuando estas condiciones no se cumplen, los retrasos temporales producen discrepancias que reducen la certidumbre del modelo respecto a la aproximación espacial (Otto *et al.*, 2020), tal como en el caso del modelo de primavera. El Lago de Chapala se caracteriza por ser un cuerpo de agua con una fuerte dinámica de corrientes internas e intenso oleaje que favorece la mezcla vertical y horizontal de los componentes del agua; en donde las corrientes alcanzan velocidades medias entre 2 y 30 cm s⁻¹ provocadas por vientos de 5 a 8 m s⁻¹ capaces de desplazar masas de agua por varias decenas de metros o incluso más de 1 km por hora (Filonov & Tereshchenko, 1999; Filonov, 2002; Ávalos-Cueva *et al.*, 2016).

La hidrodinámica del lago implica un fuerte componente de aleatoriedad espacial asociada con los retrasos temporales entre el paso del satélite y las mediciones in situ,



lo que consecuentemente afecta la certidumbre de modelos empíricos, induciendo grandes desviaciones que reducen su capacidad de predicción. En nuestro caso la evaluación de la predicción de los modelos y su validación mediante la correlación directa con información de mediciones históricas representa una forma de atenuar la incertidumbre asociada al efecto de aleatoriedad que implica la hidrodinámica del lago. Eventualmente, la ausencia de información cuasi-sincrónica en algún sitio o fecha determinada podría ser cubierta mediante la información histórica que indica la condición normal de turbidez, esto mediante los valores individuales de alguna fecha en particular o bien empleando los valores medios agrupados por periodos mensuales, estacionales o interanuales. En este sentido, los datos históricos se emplearon para validar la respuesta de los modelos, el análisis de correlación indica que la respuesta del modelo para la temporada de primavera presentó una correlación fuerte a muy fuerte respecto a la turbidez media estacional o interanual, cuyos coeficientes de correlación son semejantes al coeficiente de correlación del modelo respecto a las mediciones cuasi-sincrónicas de fechas cercanas a la toma de la imagen. En el caso del modelo de verano-otoño, la correlación fue débil a moderada (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación del coeficiente de correlación entre la turbidez estimada mediante precepción remota e imagen satelital y mediciones de campo

Turbidez estimada	Turbidez medida en campo			
	Mediciones cuasi-sincrónicas	Media mensual	Media estacional	Media interanual 2000-2018
Primavera (Ec. 1)	0.917	0.207	0.861	0.875
Verano-otoño (Ec. 2)	0.689	0.683	0.660	0.632

En cuanto al gradiente horizontal, nuestros resultados indican que la turbidez es estable y con poca variación en los sectores centro y oeste del lago, esto cambia en dirección al sector oriental, donde la turbidez incrementa sustancialmente, este gradiente es consistente con lo que se reporta previamente (Lind *et al.*, 1992). En esta zona el patrón espacial se caracteriza por un gradiente que incrementa conforme la columna de agua es más somera y nos acercamos a la orilla del lago. Los valores más altos de turbidez se observan en la desembocadura del río Lerma y el arroyo La Pasión donde se depositan grandes cantidades de sedimentos, esto sobre la estructura del delta y justo donde la altura de la columna de agua es somera. Es en estas zonas, donde el espesor de la columna ha reducido sustancialmente desde los años 80s tal que la relación de profundidad de mezcla y la profundidad fótica favorecen la disponibilidad de luz natural, esta propiedad morfológica del lecho lacustre favorece la producción de algas (Davalos *et al.*, 1989; Lind *et al.*, 1992; Lind



& Davalos-Lind, 2002), cuya proliferación eventualmente es capaces de producir la turbidez del agua.

Por otra parte, el análisis diferenciado de la turbidez respecto a su comportamiento estacional también permite la distinción de dos características del Lago de Chapala. La primera relacionada con la dinámica aparente del cuerpo de agua, las imágenes instantáneas de la temporada verano-otoño delinean la turbidez asociada a plumas de material particulado proveniente de los principales efluentes del lago (Figuras 5A y B). Mientras que las imágenes instantáneas resultantes del modelado de la turbidez para la temporada de primavera muestran que el gradiente horizontal es bastante homogéneo por grandes distancias y cambia abruptamente solo en las orillas del sector oriental del lago (Figuras 5C y D). La segunda característica tiene que ver con la magnitud de la turbidez, la cual fue sistemáticamente mayor durante el verano-otoño que en la temporada de primavera. Estas estimaciones son consistentes con la condición normal de la turbidez que reporta la propia CONAGUA, el análisis de los datos históricos (2000-2018) indican que normalmente la turbidez media intra-anual en el lago disminuye durante los meses mayo y agosto, incrementando a partir de septiembre cuando la temporada de lluvias está en su segunda parte y muy próxima a concluir. Esto se puede observar con mayor facilidad en la variación estacional de la turbidez la cual varía entre 29.2 y 33.9 UNT (Figura 6) para el sector occidental y central del lago; mientras que la variación estacional de la turbidez máxima (valores casi exclusivos del sector oriental) muestra un gradual incremento de la turbidez a partir de invierno, alcanzando valores máximos entre el verano y otoño del año siguiente. Estos patrones temporales son semejante a los que reportan Lind *et al.* (1997).

En términos generales, el Lago de Chapala se caracterizar por ser un cuerpo de agua cuya turbidez incrementó sustancialmente a partir del descenso en el volumen de almacenamiento (Limón-Macías & Lind, 1990). La turbidez está controlada por material en suspensión cuya principal composición son arcillas que están en constante recirculación a través de la columna (Davalos *et al.*, 1989; Lind *et al.*, 1992). Especial interés representa el sector oriental del lago puesto que es la zona de mayor turbidez, estudios previos (Lind *et al.*, 1997; Lind & Davalos-Lind, 2002) señalan que en esta zona de aguas someras se presentan las condiciones adecuadas como la mezcla en la columna de agua, la profundidad fótica y la disponibilidad de nitrógeno como el nutriente limitante para que se produzca la fotosíntesis del fitoplancton para dar lugar a eventos de crecimiento de algas, los cuales han sido registrados frecuentemente a través de mediciones de Chl-a por parte de la CONAGUA desde la década de los años 70.

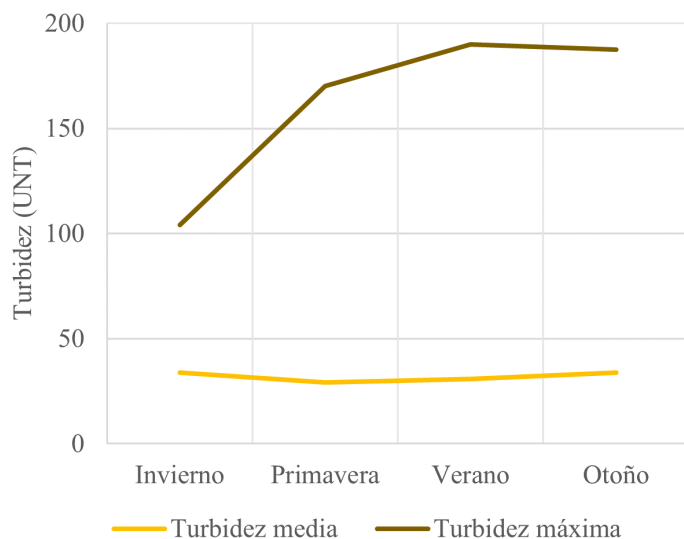


Figura 6. Cambio estacional de la turbidez durante el periodo 2000-2018.
Fuente: Comisión Nacional del Agua.

Las estimaciones obtenidas de los modelos de turbidez del presente estudio para las estaciones de primavera y verano-otoño (Figura 5) parcialmente corroboran la diferencia en magnitudes de la turbidez respecto a su posición en el lago, pero además enfatizan los contrastes en los patrones de variación estacional. Pero quizá la información más importante que estos ofrecen recae en la identificación de la naturaleza del material que produce la turbidez. El uso de la respuesta espectral del IRC acota el análisis de la turbidez específicamente a la fracción de material inorgánico en suspensión cuya característica espectral es que se manifiesta entorno a los 860 nm, excluyendo de manera definitiva la contribución del material orgánico (expresado mediante su actividad fotosintética) a la turbidez. En este sentido, los resultados del modelado y la información obtenida en campo tanto en este estudio como el registro histórico de la CONAGUA indican que el material en suspensión de origen inorgánico representa la principal causa de la turbidez en el Lago de Chapala. El registro histórico de la CONAGUA muestra que las mediciones individuales de Chl-a mayores a 30 mg m⁻³ representan alrededor del 10% del total de las mediciones realizadas en los periodos 1974-1998 y 2012-2018. Este dato sugiere que efectivamente se han presentado eventos extraordinarios de elevada producción primaria que conduce a la proliferación de algas, contribuyendo a la turbidez natural del lago.

A casi 40 años de la reducción sustancial del volumen de agua en el Lago de Chapala y sus efectos en la disponibilidad y calidad del agua, el clima y en las actividades económicas que depende del lago; la investigación científica y fuentes oficiales de información indican que este ecosistema se ha autorregulado de manera tal que ha



evitado un estado de eutrofización. En parte, este proceso de autorregulación está inducido por la propia turbidez, Davalos & Lind (1989) señalaban desde entonces que en lugar de considerar la implementación de las prácticas de manejo de cuenca para el control de descargas de nutrientes al lago como parte de las principales acciones de remediación, se debería tener cuidado sobre los efectos que derivan de las prácticas de manejo que eventualmente se podrían adoptar sobre el control de la turbidez de este ecosistema. Bajo este contexto, las ventajas que ofrece la tecnología satelital de acceso abierto y la implementación de modelos para la interpretación y predicción de propiedades ópticas como la turbidez, representan recursos fundamentales para conocer el estado de equilibrio que guardan los ecosistemas acuáticos como el Lago de Chapala. Por lo tanto, estos recursos ofrecen información complementaria y necesaria para llevar a cabo la evaluación continua de propiedades y/o procesos que ocurren en estos ecosistemas de alto valor ambiental.

Conclusiones

Los modelos empíricos como métodos indirectos al monitoreo de propiedades ópticas en cuerpos de agua, tienen sus limitaciones debido a la forma de abordar el problema de calibración, por lo que la certidumbre de su respuesta aún está sujeta a mejoras. Sin embargo, antes de que se puedan desarrollar métodos o modelos que reduzcan a su mínima expresión la incertidumbre en sus resultados, la fácil y rápida implementación de modelos empíricos representan una ventaja que viene a subsanar la falta de información que es intrínseca al mecanismo de medición directa, tanto en la cobertura espacial como en la representatividad temporal. Un mayor esfuerzo de investigación es necesario para mejorar la respuesta de este tipo de modelos, o mejor aún plantear métodos o modelos analíticos que generen resultados más exactos y precisos y que contribuyan al reconocimiento de los procesos con manifestaciones ópticas asociadas a la propia dinámica del lago, o bien sirvan como insumo para entender el funcionamiento de procesos primarios como cambios en los gradientes de temperatura y el pH, la saturación de oxígeno, la regulación de la producción primaria o la neutralización de ciclos bioquímicos donde intervienen nutrientes como fosfatos y nitratos, entre otros tantos.

Financiamiento y agradecimientos

Este estudio está financiado con recursos del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Jalisco a través del Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco para atender Retos Sociales “FODECIJAL, 2023”, clave de proyecto 10693-2023; así como por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, en el marco del Fondo de Problemas Nacionales, clave de proyecto: 248408-PDCPN-2014-01.



Referencias

- Aparicio, J. (2001). Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En A. Hensen & M. Afferden (eds.) *The Lerma-Chapala Watershed* (pp.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0545-7>
- American Public Health Association. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed.* American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environmental Federation.
- Arias-Rodríguez, L. F., Duan, Z., Díaz-Torres, J. J., Basilio-Hazas, M., Huang, J., Kumar, B. U., Tuo, Y., & Disse, M. (2021). Integration of Remote Sensing and Mexican Water Quality Monitoring System Using an Extreme Learning Machine. *Sensors*, 21(12), 4118. <https://doi.org/10.3390/s21124118>
- Ávalos-Cueva, D. ., Filonov, A. ., Tereshchenko, I. ., Monzón, C. ., Pantoja-González, D. ., & Velázquez-Muñoz, F. . (2016). The level variability, thermal structure and currents in Lake Chapala, Mexico. *Geofísica Internacional*, 55(3), 175–187. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2016.55.3.1720>
- Barrett, D. C., & Frazier, A. E. (2016). Automated method for monitoring water quality using Landsat Imagery. *Water*, 8, 257. <https://doi.org/10.3390/w8060257>
- Bastin, J. F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., Van den Hoogen, J., Hordijk, I., Ma, H., Majumder, S., Manoli, G., Maschler, J., Mo, L., Routh, D., Yu, K., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLOS ONE*, 14(10), e0224120. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224120>
- Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., Hooper, D. U., Lavorel, S., Sala, O. E., Hobbie, S. E., Mack M. C., & Diaz, S. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234-242. <https://doi.org/10.1038/35012241>
- Chapman, Deborah V, World Health Organization, UNESCO & United Nations Environment Programme (1996). *Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.* University Press Cambridge. <https://iris.who.int/handle/10665/41850>
- Comisión Nacional del Agua (2016). *Atlas del Agua en México.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Calidad del agua en México.* Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- Dávalos, L., Lind, O. T., & Doyle, R. D. (1989). Evaluation of phytoplankton–limiting factors in Lake Chapala, México: Turbidity and the spatial and temporal



- variation in algal assay response. *Lake and reservoir Management*, 5(2), 99-104. <https://doi.org/10.1080/07438148909354404>.
- de Anda, J., Shear, H., Maniak, U., & Valle, P.F. (2004). SOLIDS DISTRIBUTION IN LAKE CHAPALA, MEXICO 1. JAWRA. *Journal of the American Water Resources Association*, 40, 97–109. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01013.x>.
- de León-Mojarro, B.; Medina-Mendoza, R.; González-Casillas, A. (2001). Natural Resources Management in the Lerma-Chapala Basin. En A. M. Hansen & M. van Afferden (eds.) *The Lerma-Chapala Watershed*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0545-7_3
- Filonov, A. E., & Tereshchenko, I. E. (1999). Thermal lenses and internal solitons in Chapala Lake, Mexico. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 17, 308–314. <https://doi.org/10.1007/BF02842824>.
- Filonov, A. E. (2002). On the dynamical response of Lake Chapala, Mexico to lake breeze forcing. *Hydrobiologia*, 467, 141–157. <https://doi.org/10.1023/A:1014998411755>.
- Hansen, A.M.; van Afferden, M. (2001). Toxic Substances. En *The Lerma-Chapala Watershed*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0545-7_4.
- Harrington, J. A., Schiebe, F. R., & Nix, J. F. (1992). Remote sensing of Lake Chicot, Arkansas: Monitoring suspended sediments, turbidity, and Secchi depth with Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 39(1), 15–27. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90137-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90137-9).
- Hicks, B. J., Stichbury, G. A., Brabyn, L. K., Allan, M. G., & Ashraf, S. (2013). Hindcasting water clarity from Landsat satellite images of unmonitored shallow lakes in the Waikato region, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 7245–7261. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3098-2>.
- Jay, J.A., Ford, T.E. (2001). Water Concentrations, Bioaccumulation, and Human Health Implications of Heavy Metals in Lake Chapala. En A.M. Hansen & M. van Afferden, (eds.) *The Lerma-Chapala Watershed*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0545-7_5.
- International Organization for Standards. (2016). *International Standard ISO 7027—Water Quality—Determination of Turbidity—Part 1: Quantitative Methods*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/62801.html>.
- Kallio, K., Attila, J., Härmä, P., Koponen, S., Pulliainen, J., Hyytiäinen, U. M., & Pyhälähti, T. (2008). Landsat ETM+ images in the estimation of seasonal lake water quality in boreal river basins. *Environmental management*, 42(3), 511–522. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9146-y>.



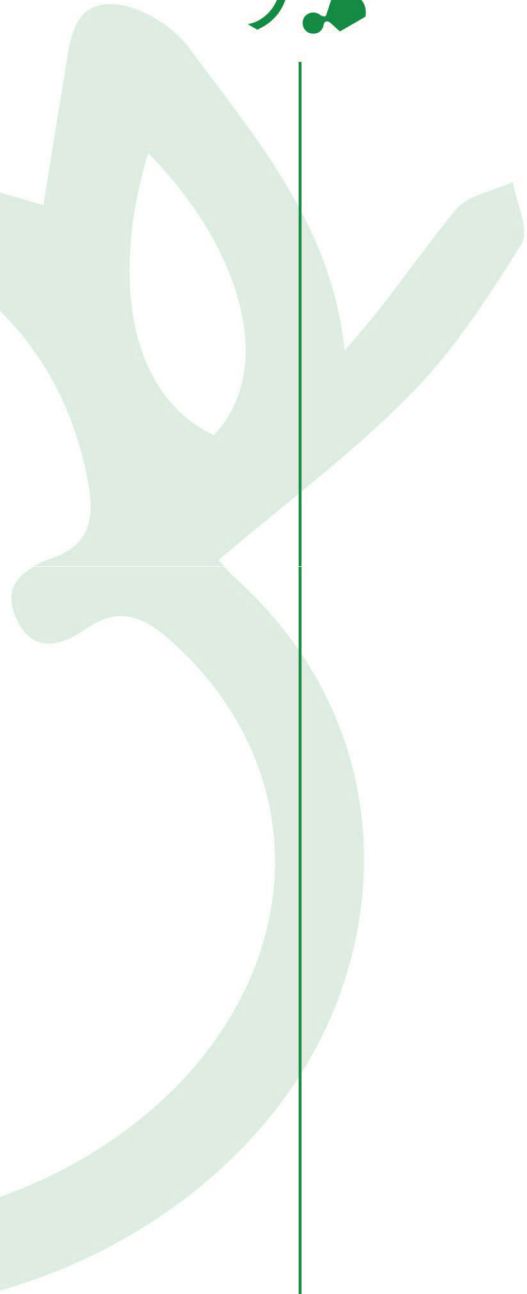
- Kay, S., Hedley, J. D., & Lavender, S. (2009). Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths. *Remote Sensing*, 1(4), 697–730. <https://doi.org/10.3390/rs1040697>.
- Kloiber, S. M., Brezonik, P. L., & Bauer, M. E. (2002). Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, 36(17), 4330–4340. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00146-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00146-X).
- Lind, O. T., Doyle, R., Vodopich, D. S., Trotter, B. G., Limon, J. G., & Dcivalos-Lind, L. (1992). Clay turbidity: Regulation of phytoplankton production in a large, nutrient-rich tropical lake. *Limnology and Oceanography*, 37(3), 549–565. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.3.0549>.
- Lind, O. T., Chrzanowski, T. H., & Dávalos-Lind, L. (1997). Clay turbidity and the relative production of bacterioplankton and phytoplankton. *Hydrobiologia* 353, 1–18. <https://doi.org/10.1023/A:1003039932699>.
- Lind, O. T., & Dávalos-Lind, L. O. (2002). Interaction of water quantity with water quality: The Lake Chapala example. *Hydrobiologia*, 467, 159–167. <https://doi.org/10.1023/A:1014902630410>.
- Lobo, F. L., Costa, M. P., & Novo, E. M. (2015). Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, 157, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>.
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251 – 2259. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909>.
- Macías, J. G. L., & Lind, O. T. (1990). The Management of Lake Chapala (México): Considerations After Significant Changes in the Water Regime. *Lake and Reservoir Management*, 6(1), 61–70. <https://doi.org/10.1080/07438149009354696>.
- Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855–6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>.
- Membrillo-Abad, A. S., Torres-Vera, M. A., Alcocer, J., Prol-Ledesma, R. M., Oseguera, L. A., & Ruiz-Armenta, J. R. (2016). Trophic State Index estimation from remote sensing of Lake Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 183-191. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2016.2.495>.
- Miljojkovic, D., Trepšić, I. & Milovancević, M. (2019). Assessment of physical and chemical indicators on water turbidity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 527, 121171. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121171>.



- Oertli, B., Biggs, J., Céréghino, R., Grillas, P., Joly, P., & Lachavanne, J. B. (2005). Conservation and monitoring of pond biodiversity: introduction. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 15, 535–540. <https://doi.org/10.1002/aqc.752>
- Otto, P., Vallejo-Rodríguez, R., Keesstra, S., León-Becerril, E., de Anda, J., Hernández-Mena, L., del Real-Oliver, J., & Díaz-Torres, J. J. (2020). Time Delay Evaluation on the Water-Leaving Irradiance Retrieved from Empirical Models and Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 12(1), 87. <https://doi.org/10.3390/rs12010087>
- Rodríguez-Padilla, J. J. (2000). *Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de Calidad de Agua del Lago de Chapala (México)* [tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey]. Repositorio TEC. https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/569368/RodriguezPadilla_TesisdeMaestriaPDFA.pdf?sequence=10
- Schalles, J. (2006). Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentrations in coastal. En Richardson, L., Ledrew, E. (eds.), *Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 9*. (pp. 27-79). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3968-9_3
- Secretaría de Gobernación. (24 de agosto 2021). *NOM-127-SSA1-2021. Norma Oficial Mexicana, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5650705>
- Shi, W., & Wang, M. (2009). An assessment of the black ocean pixel assumption for MODIS SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1587–1597. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.011>
- Torres-Vera, M. A. (2023). Mapping of total suspended solids using Landsat imagery and machine learning. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(11), 11877-11890. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04787-y>
- United State Environmental Protection Agency. (1997). *Monitoring Water Quality, Volunteer Stream Monitoring: A Methods Manual; Office of Water 841-B-97-003*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/stream.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2015). *Landsat surface reflectance data (ver. 1.1, March 27, 2019)*. *U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015-3034, 1 p.*, <https://doi.org/10.3133/fs20153034>.
- U.S. Geological Survey. (2019). *Landsat 8 Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Guide*. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls. [54](https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-</p></div><div data-bbox=)



- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Vincent, R. K., Qin, X., McKay, R. M. L., Miner, J., Czajkowski, K., Savino, J., & Bridgeman, T. (2004). Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 89(3), 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Wang, M., & Shi, W. (2007). The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing. *Optics Express*, 15(24), 15722–15733. <https://doi.org/10.1364/OE.15.015722>
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed. Elsevier Academic Press
- Williams, P., Whitfield, M., Biggs, J., Bray, S., Fox, G., Nicolet, P., & Sear, D. (2004). Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England. *Biological Conservation*, 115(2), 329–341. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(03\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00153-8)
- World Health Organization. (2017). *Water Quality and Health-Review of Turbidity: Information for regulators and water suppliers*. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-17.01>



Efecto de un plasma no térmico sobre la sobrevivencia de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 inoculadas en cilantro (*Coriandrum sativum* L.)

Alma Fabiola Araujo-Guzmán¹, Ana Tarin Gutiérrez-Ibáñez^{2*}, María Dolores Mariezcurrena-Berasain², Rosa Laura Ocaña-de Jesús², Antonio Laguna-Cerda² e Itzel Rojas-Puebla²

¹Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario No. 100 Col. Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000.

²Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario No. 100 Col. Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000.

*Autor de correspondencia: atarini@uaemex.mx

Resumen

Palabras clave:

cilantro, *E. coli*, inactivación, plasma no térmico, *Salmonella*

Este estudio determinó el efecto de un plasma no térmico sobre la sobrevivencia de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 en plantas de cilantro. Se establecieron bajo condiciones de invernadero tres tratamientos con 60 plantas cada uno: T1 (*E. coli*), T2 (*Salmonella*) y T3 (Testigo). Las plantas se inocularon con 100 mL de suspensión bacteriana (2.5×10^4 UFC/mL) a los 30 y 45 días posteriores a la siembra. A los 60 días después de la inoculación se obtuvieron muestras de la planta y se colocaron en tubos con 9 mL de agua peptonada para ser expuestos al plasma a 60, 120 y 180s, con una potencia de 15 watts y una frecuencia de 15 hertz. Una vez irradiadas las muestras, se realizó el análisis microbiológico donde *E. coli* mostró una disminución máxima del 60% y *Salmonella* del 30%. Cabe destacar que el uso de plasma no térmico reduce la carga microbiana aportando mayor seguridad alimentaria.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2), 57-69.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12763061>

Recibido: 10 abril 2024
Revisado: 22 de mayo 2024
Aceptado: 15 julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

El cilantro (*Coriandrum sativum* L.) es nativo del sur de Europa y del oeste de la región Mediterránea (Wei *et al.*, 2019), siendo una especie ampliamente cultivada como hierba medicinal, aromática y de condimento de mayor consumo humano (Ordoñez, 2010)



y presenta actividad antioxidante, antiinflamatoria, entre otras cualidades (Laribi *et al.*, 2015). En México el cilantro se consume en fresco y de manera cruda, motivo por el cual este ha pasado a ser una fuente importante de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA). *Escherichia coli* y *Salmonella* Typhimurium son unas de las principales cepas reportadas como causantes de ETA, estos microorganismos han mostrado una gran capacidad de mantenerse por tiempo prolongado fuera de su nicho ecológico natural, adaptándose a condiciones adversas y tienen la capacidad de internalizarse en el producto, protegiéndose de los sanitizantes (FAO, 2020).

La contaminación de los productos hortícolas depende del manejo antes y después de la cosecha, puede ocurrir en cualquier etapa de la cadena de producción y distribución. Se reportan como principales fuentes el uso de agua de riego contaminada, los abonos a base de estiércol no tratados adecuadamente, el empleo de semillas contaminadas y los diferentes vectores como animales, insectos y seres humanos (Ocaña *et al.*, 2019). Se ha calculado que cada año se enferman en el mundo 600 millones de personas como consecuencia de enfermedades diarreicas, cuya causa puede atribuirse, en la mayoría de los casos, a la ingesta de agua o alimentos contaminados por microorganismos patógenos (OMS, 2020).

Las metodologías hasta hoy empleadas para la desinfección de productos agrícolas mínimamente procesados o también conocidos como de consumo directo se han enfocado en utilizar agentes químicos, físicos y biológicos para reducir la presencia de bacterias enteropatógenas (Solenó, 2015). Las soluciones de hipoclorito son utilizadas para lavar productos cuyo consumo es en fresco y recién cortados; sin embargo, las concentraciones empleadas se encuentran dirigidas a prevenir la contaminación cruzada de productos con bacterias entéricas por medio del agua de lavado. Los niveles de hipoclorito empleados actualmente no son suficientes para matar el 100% de agentes patógenos, además que en dosis no controladas causan intoxicaciones y generan daños al ambiente (Behrsing *et al.*, 2000; Takeuchi *et al.*, 2001; Garmendia & Vero, 2006; Boyacioglu *et al.*, 2013; Arianzo *et al.*, 2023). Por otro lado, los métodos físicos como los procesos de irradiación no garantizan la reducción de microorganismos con la aplicación de Cobalto 60 (^{60}Co), resultan poco eficaces contra *E. coli* y esporas de *Clostridium botulinum* (Beattie, 2010). Por otra parte, los tratamientos térmicos han sido bien aceptados, aunque presentan ciertos inconvenientes al ser aplicados, tales como la pérdida de nutrientes y una considerable reducción de la calidad organoléptica de algunos alimentos. Por lo tanto, son necesarias técnicas respetuosas con el ambiente, novedosas y efectivas para reducir las poblaciones bacterianas entéricas en productos de consumo en fresco (Boyacioglu *et al.*, 2013).

Dentro de esas nuevas tecnologías se encuentran las tecnologías emergentes de conservación de los alimentos. Una de sus aplicaciones es inactivar los microor-



ganismos y enzimas presentes en los mismos sin ser alteradas sus características nutritivas, organolépticas y funcionales, como ejemplos de estas se encuentran las altas presiones hidrostáticas, los pulsos eléctricos de alto voltaje, los ultrasonidos, los pulsos de luz, los campos magnéticos oscilantes y más recientemente, el plasma atmosférico no térmico. Este último consiste en el empleo de gases ionizados con una gran capacidad de inactivación microbiana, además presenta otras ventajas como su bajo costo de aplicación, el empleo de tiempos de tratamientos cortos a bajas temperaturas, la posibilidad de tratar una amplia variedad de alimentos, tanto líquidos como sólidos, y ser una tecnología sostenible (Šimončicová, *et al.*, 2019). Dentro de los beneficios que puede llegar a aportar está el aumento de vida de anaquel de los alimentos tratados y la destrucción de células reproductivas de diversos grupos microbianos (bacterias, levaduras y hongos). El conjunto de todas estas atribuciones ha hecho que se considere como una tecnología sumamente prometedora para la conservación de los alimentos (Rossi *et al.*, 2009; Liao *et al.*, 2018). En esta investigación se comparó la efectividad de un plasma no térmico con diferentes tiempos de exposición: 60, 120 y 180s, sobre la sobrevivencia de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 inoculadas en plantas de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) bajo condiciones de invernadero.

Materiales y métodos

Obtención de material vegetativo

El desarrollo del experimento se realizó en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se utilizó semilla certificada de cilantro variedad Long Standing, obtenida en una comercializadora de Villa Guerrero Estado de México, la cual fue sembrada en una mezcla de sustrato (40% de peat moss, 40% de agrolita y 20% de lombricomposta) y esterilizada en autoclave mediante vapor húmedo a una temperatura de 121 °C por 15 min y 1 atm de presión, con la finalidad de garantizar que estuviera libre de patógenos y no afectara la inoculación. Posteriormente la mezcla fue depositada en bolsas de polietileno de 35 x 35 cm, se colocaron 50 semillas por bolsa. Las plántulas fueron conservadas en condiciones de invernadero durante todo el ciclo de producción. De manera manual se realizaron las labores culturales del cultivo como el control de maleza después de 15 a 20 días de brotar la semilla. El riego se suministró con agua de pozo con las cantidades necesarias según el desarrollo del cultivo. Antes de la inoculación de las bacterias se realizaron análisis microbiológicos de la mezcla del sustrato, de las plántulas y el agua de riego para descartar la presencia de organismos coliformes termotolerantes, bajo la Norma Oficial Mexicana 113 -SSA1-1994. Método para cuenta de microorganismos coliformes en placa en Agar de Bilis y Rojo Violeta (Bioxon®).



Reactivación de cepas bacterianas

Las cepas utilizadas de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 fueron donadas por el Laboratorio de Patogenicidad Bacteriana del Hospital Infantil de México Federico Gómez. Estas se almacenaron en una solución de agua-glicerol (50:50) a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior uso. Los análisis microbiológicos se realizaron en el Laboratorio de Calidad de los Productos Agropecuarios de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Las bacterias se reactivaron en Caldo Soya Tripticaseina (CST) (DIBICO ®) y se hicieron crecer en medios selectivos, Agar MacConkey (DIBICO ®), Agar Eosina Azul de Metileno (DIBICO ®), Agar *Salmonella Shigella* (BD BIOXON ®), Agar Cromogénico *E. coli* O157:H7 (DIBICO ®) y Agar Xilosa Lisina Desoxicolato (DIBICO ®) a una temperatura de $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Después de la reactivación se realizaron las pruebas bioquímicas de reactividad (IMViC): Indol, Movilidad, Voges-Proskauer, Sulfuro, complementadas con Rojo de Metilo, Citrato Simonns y descarboxilación de Ornitina (Koneman *et al.*, 2008). Asimismo, se realizaron pruebas de tinción de Gram.

Inoculación bacteriana y toma de muestra

El inóculo se preparó con Agua Peptonada Buferada (APB) al 0.1% a un pH de 7 con un volumen de 100 mL de suspensión bacteriana que contenía un promedio de 1×10^4 UFC/ mL para cada cepa. El inóculo fue colocado directamente al sustrato cerca de la raíz (Figura 1). A los tres días después de la inoculación se realizó un monitoreo microbiológico con la finalidad de verificar que ya se encontraban presentes en la planta de cilantro las bacterias inoculadas y realizar el primer conteo antes de la aplicación del plasma atmosférico no térmico.



Figura 1. Inoculación de las bacterias enteropatógenas



Por cada cepa bacteriana se utilizaron tres tratamientos y un grupo testigo, cada tratamiento consto de 60 macetas, dando un total de 180 muestras por grupo bacteriano. Las plantas se inocularon a los 30 y 45 días después de la siembra. Todo el material fue colectado y transportado de acuerdo con lo indicado por la Norma Oficial Mexicana NOM-109-SSA1-1994.

Aplicación del plasma atmosférico no térmico

La aplicación del plasma atmosférico no térmico se realizó a los 60 días del crecimiento del cultivo en la etapa de elongación del tallo y formación de inflorescencia. Las muestras fueron pesadas en condiciones asépticas, utilizando 10 g de muestra compuesta de la planta del cilantro (tallo, raíz y hojas) homogenizadas con 90 mL de agua peptonada buferada (APB). De esta solución se transfirieron 10 mL a tubos de ensayo para ser expuestos a un plasma generado a una potencia de 15 watts por una fuente pulsada a una frecuencia de 10 kHz y un voltaje entre electrodos de 1.0 kV (Figura 2). Los tiempos de exposición fueron 60, 120, y 180s, realizándose tres repeticiones a los distintos tiempos de interacción, contándose con un grupo testigo. A todas las muestras se les determinó pH y temperatura con un medidor multiparamétrico (Thermoscientific™ Stard) antes y después de la aplicación del tratamiento con el plasma. Las muestras fueron llevadas al laboratorio en donde se realizaron los análisis microbiológicos. Todo el material se colectó y transportó según lo indicado por la Norma Oficial Mexicana NOM-109-SSA1-1994.

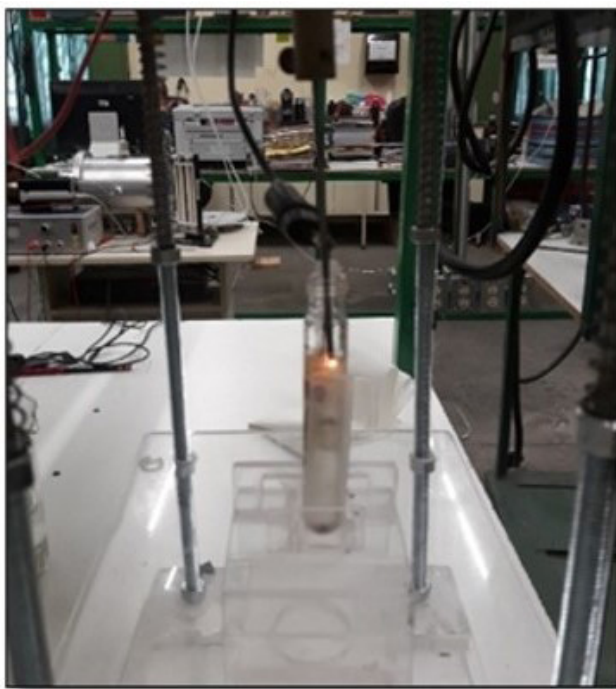


Figura 2. Aplicación del plasma no térmico



Análisis microbiológicos realizados después de la aplicación del plasma

La preparación de las muestras se realizó mediante el método microbiológico indicado por la Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994. Se empleó un método destructivo utilizando un mortero para homogenizar la muestra y de la suspensión obtenida se prepararon diluciones decimales seriadas ($10^0 - 10^4$).

Para la cuantificación de *E. coli* a partir de las diluciones se tomó 1 mL para hacer siembra directa por duplicado en placas con agar bilis rojo violeta (Bioxon®), las cuales se incubaron a una temperatura de 45 °C. Después de 24 h de incubación se realizó el recuento de colonias lactosa positivas y se estriaron en agar cromogénico O157:H7 (DIBICO) para verificar que sí correspondía a las colonias inoculadas. Estas placas se incubaron a 35 °C por 24h. Para confirmar la presencia de *E. coli* se tomó como referencia el crecimiento característico indicado en la Norma Oficial NOM 113-SSA1-1994.

La detección de *Salmonella* Typhimurium se realizó de acuerdo con la Norma Oficial NOM-114-SSA1-1994. El esquema general marca las siguientes etapas: pre-enriquecimiento en Agua Peptonada (APA) 0.1% para restaurar las células de *Salmonella* a una condición fisiológica estable; posteriormente un enriquecimiento selectivo con el propósito de incrementar las poblaciones de *Salmonella* e inhibir otros organismos presentes en la muestra y finalmente selección y cuantificación en medio sólido-selectivo Agar *Salmonella Shigella* (BD BIOXON) que restringe el crecimiento de otros géneros diferentes a *Salmonella* y permite el reconocimiento visual de las colonias.

Las colonias recuperadas se expresaron como \log_{10} UFC/mL y la reducción bacteriana de cada cepa empleada se calculó a partir de la recuperación de células después de los tratamientos aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Reducción} = \left(\text{Log}10 \frac{\text{UFC}}{\text{mL}} \text{ at} - \text{Log}10 \frac{\text{UFC}}{\text{mL}} \text{ dt} \right) \quad (1)$$

*at=antes del tratamiento

*dt= después del tratamiento

Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente al azar, se establecieron tres tratamientos con 60 plantas cada uno: T1 (*E. coli* O157:H7), T2(*Salmonella* Typhimurium) y T3 (Testigo). Se comparó la efectividad del plasma a los 60, 120, y 180 s. Los resultados fueron evaluados por un ANDEVA bifactorial ($p \leq 0.05$) para identificar el mejor tiempo de exposición y conocer el efecto del plasma en cada cepa. Frente al hallazgo de diferencias significativas se aplicó una prueba de Tukey al 5% para



identificar la cepa, tiempo de exposición e interacción que llevaron a los menores recuentos. Para ello se empleó el programa estadístico SAS (SAS, 2002).

Resultados y Discusión

Los resultados de los análisis microbiológicos realizados al sustrato, al agua de riego y a las semillas de cilantro fueron negativos, lo cual indicó que el material se encontraba libre de bacterias enteropatógenas que pudieran intervenir en el estudio.

En los medios selectivos se observó el crecimiento de colonias transparentes sobre fondo rojo, de coloración rosada, verdosas con brillo metálico, verde azuladas correspondientes a *E. coli* y colonias incoloras con centro negro, así como colonias rojas con centro de color negro para *Salmonella*.

Los resultados de la confirmación bioquímica surgen de la comparación con la matriz en damero simplificada para la identificación de las bacterias enteropatógenas del diagnóstico microbiológico Koneman *et al.* (2008). Dichas pruebas fueron positivas de acuerdo con el grupo que correspondían confirmando la identidad de ambos grupos microbianos (Tabla 1).

Tabla 1. Pruebas bioquímicas IMViC para la identificación de *Escherichia coli* y *Salmonella Typhimurium*

	Prueba de catalasa	Tinción de Gram	Indol	Motilidad	Ornitina	Voges proskauer	Rojo de metilo	Citrato Simons	Urea	Triple Azúcar Hierro	H ₂ SO ₃	<i>Salmonella</i>	<i>E. coli</i>
<i>Escherichia coli</i>	+	-	+	+	+	-	+	-	-	A/A	-	-	+
<i>Salmonella Typhimurium</i>	+	-	-	+	+	-	+	+	+	A/A	+	+	-

Positivo (+), Negativo (-), A/A: Pico de flauta ácido/profundidad ácida; Al/Ac: Pico de flauta Alcalino/profundidad ácida (negra) (Koneman, 2018).

En las Figura 3 y 4 se observan los valores obtenidos del pH y la temperatura de las muestras tratadas con el plasma, que se midieron antes e inmediatamente después de la exposición al tratamiento en todos los tiempos de interacción 0, 60, 120 y 180s para ambas bacterias. Los resultados obtenidos de pH no presentaron cambios de acuerdo con el tiempo empleado de exposición al plasma, mientras que los rangos de temperatura incrementaron de manera paulatina conforme se incrementa el tiempo de exposición al plasma. En el tiempo 0 muestra un pH inicial de 6.14 a una temperatura de 24.4 °C y a los 180s el pH fue de 6.07 a temperatura de 23.9 °C. Se tuvo un rango de variación de 1.14% para el pH; para el comportamiento observado que se produce después del tratamiento al tiempo 0, un pH de 5.98 a temperatura de 24.3 °C y 6.08 al tiempo de 180s y temperatura de 31.5 °C, lo que representa una variación de 1.6% para pH y 25.23% correspondiente a la temperatura.

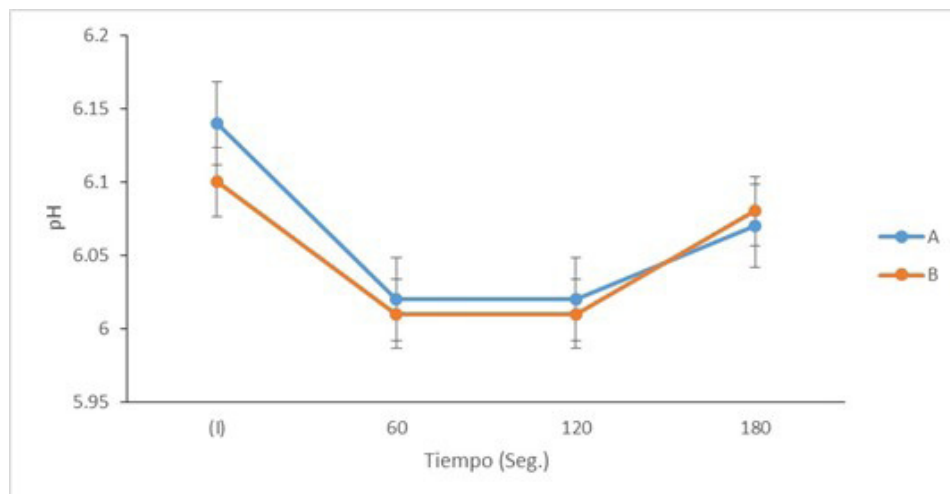


Figura 3. Variaciones de pH por interacción de un plasma no térmico en cilantro
A: Sin exposición al plasma; B: Con exposición al plasma; I: Tiempo inicial.

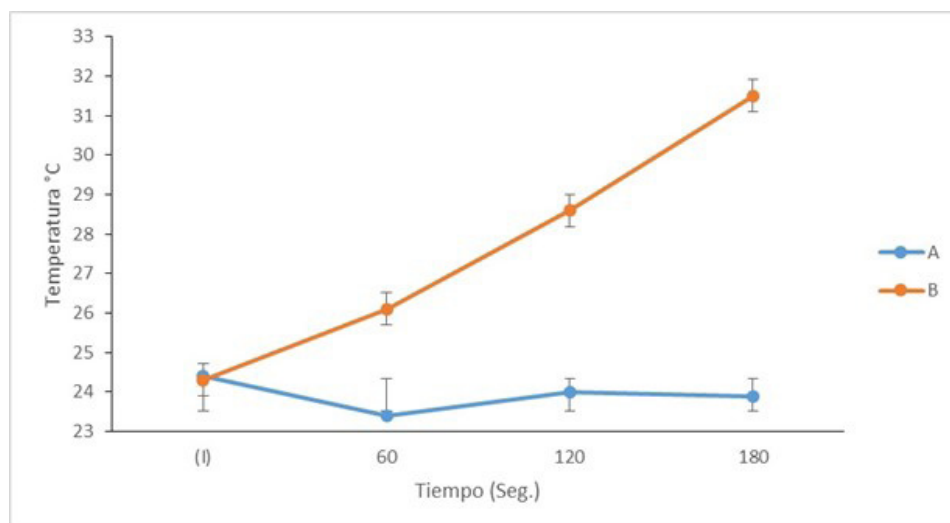


Figura 4. Variaciones de Temperatura por interacción de un plasma no térmico en cilantro
A: Sin exposición al plasma; B: Con exposición al plasma; I: Tiempo inicial.

Los resultados obtenidos no interfieren con la sobrevivencia de las bacterias en estudio ya que las condiciones de crecimiento reportadas se encuentran en pH de 4.0 a 9.0 con un óptimo que va de 6.5 a 7.5 (Alfaro, 2018). En este sentido, Spector y Kenyon (2012) resaltan la capacidad de *Salmonella* para adaptarse a cambios en el ambiente donde se encuentre. Para el caso de la temperatura, a pesar de presentar un incremento, no es un factor que influya en la muerte bacteriana, ya que *Salmonella* puede crecer en un rango que va de 2 a 54 °C y su crecimiento se ve reducido a menos de 15 °C. Los factores que podrían relacionarse con una respuesta es el serovar y el medio donde se desarrolla (Brown *et al.*, 2021) para poder sobrevivir en diversos ambientes como suelos, aguas, sedimentos, frutas y verduras.



La disminución de la concentración viable de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 se comparó logarítmicamente contra el tiempo, presentando diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). Los resultados indican la eficacia del plasma no térmico sobre la sobrevivencia de las células de *Salmonella* Typhimurium y *Escherichia coli* O157:H7 inoculadas en plantas de cilantro en condiciones de invernadero, a medida que se incrementa el tiempo de exposición se observa una reducción bacteriana con una inactivación de 1 a 21 a $2 \log_{10}$ UFC/mL.

En los datos mostrados en la Tabla 2, para *E. coli* se puede observar una disminución en el conteo de las colonias bacterianas de 12, 41 y 60% a los 60, 120 y 180s, respectivamente. Asimismo, para *Salmonella* Typhimurium se muestra un decremento de 9, 24 y 30% a los 60, 120 y 180s. Dichos resultados coinciden con lo reportado por Hu *et al.* (2008), quienes mencionan que al utilizar un plasma con fuente pulsada a una potencia de 80 watts en un tiempo menor a un minuto se logra la inactivación de *Escherichia coli* O157:H7, esto debido al estrés químico al que es sometido el microorganismo, además de que estas tecnologías pueden ser utilizadas como herramienta para la disminución de patógenos y contribuir a resolver problemas de salud pública. Otros reportes como el de Youn *et al.* (2013) indican que la sobrevivencia de la masa bacteriana de *Escherichia coli* O157:H7 se redujo en un 50% después de la exposición al plasma durante 30 min con una potencia de 30 watts, ya que el plasma tiene efectos tóxicos sobre las bacterias. Otro estudio como el de Critzer *et al.* (2007), en donde aplicaron un plasma de descarga luminiscente, observaron que las poblaciones de *Escherichia coli* O157:H7 se redujeron en $1 \log_{10}$ y $2 \log_{10}$ a un tiempo de exposición de 30 s y de 2 min. Respectivamente, mientras que la carga de *Salmonella* se redujo hasta en $2 \log_{10}$ después de 1 min de exposición. Diversos estudios señalan que los plasmas tienen efecto bactericida al presentar especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (Ahlfeld *et al.*, 2015). Sea propuesto que estas especies reactivas causan el rompimiento de la envoltura celular produciendo daños al ADN, a los lípidos celulares y a las proteínas de la membrana celular, relacionando estos efectos con la duración del tratamiento (Man *et al.*, 2020), resultados que concuerdan con la presente investigación.

Tabla 2. Reducción bacteriana de *Escherichia coli* O157:H7 y *Salmonella* Typhimurium a diferentes tiempos de exposición al plasma no térmico

Tratamiento	<i>E. coli</i> $\bar{X} \pm DS$	<i>Salmonella</i> $\bar{X} \pm DS$
(Inicial)	3.36 \pm 0.15a	3.58 \pm 0.32a
60 s	2.96 \pm 0.10b	3.26 \pm 0.19b
120 s	1.99 \pm 0.31c	2.72 \pm 0.12c
180 s	1.36 \pm 0.16d	2.52 \pm 0.15d

Medias seguidas de las mismas letras señalan ausencia de diferencias significativas por test de Tukey ($p \leq 0.05$).



Conclusiones

El presente trabajo resalta la efectividad del plasma no térmico para reducir las cargas microbianas y la supervivencia de *Salmonella* Typhimurium y *E. coli* O157:H7., con una relación directa entre los tiempos de exposición. A mayor tiempo existe una mayor reducción de carga bacteriana, lo que indica la factibilidad de emplearlo como método alternativo para la desinfección en frutas y hortalizas por contaminación de bacterias peligrosas para el ser humano o de importancia clínica.

Recomendaciones

Es importante realizar estudios a nivel celular para poder identificar el efecto del plasma sobre la estructura celular de las bacterias estudiadas e identificar el porqué de la resistencia de *Salmonella* Typhimurium al mismo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada a la alumna de doctorado y a la Universidad Autónoma del Estado de México por el apoyo brindado para esta investigación.

Referencias

- Ahlfeld, B., Li, Y., Boulaaba, A., Binder, A., Schotte, U., Zimmermann, J. L., Morfill, G., & Klein, G. (2015). Inactivation of a foodborne norovirus outbreak strain with nonthermal atmospheric pressure plasma. *mBio*, 6(1), e02300-14. <https://doi.org/10.1128/mbio.02300-14>
- Alfaro, M. R. (2018). Aspectos relevantes sobre *Salmonella* sp en humanos. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 34(3), 110-122. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=89065>
- Arienzo A., Gallo V., Tomassetti F., Antonini G. (2023). Implicación del hipoclorito de sodio como desinfectante en el procesamiento de ensaladas listas para comer y ventajas del uso de métodos alternativos de detección rápida de bacterias. *Alimentos*, 12(16), 3021. <https://doi.org/10.3390/foods12163021>
- Beattie, S. (2010). Riesgos de la irradiación de alimentos. *Investigación y Ciencia*, 40, 5-12.



- Behrsing, J., Winkler, S., Franz, P., & Premier, R. (2000). Efficacy of chlorine for inactivation of *Escherichia coli* on vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 19(2), 187 – 92. 10.1016/S0925-5214(00)00092-2
- Boyacioglu, O., Sharma, M., Sulakvelidze, A., & Goktepe, I. (2013). Biocontrol de *Escherichia coli* O157 on fresh-cut leafy greens. *Bacteriophage*, 3(1), e24620-7. <https://doi.org/10.4161/bact.24620>
- Brown, E.W., Bell, R., Zhang, G., Timme, R., Zheng, J., Hammack, T.S., & Allard, M.W. (2021). Salmonella Genomics in Public Health and Food Safety. *American Society for Microbiology*, 9(2), eESP-0008-2020. <https://doi.org/10.1128/ecosalplus.ESP-0008-2020>
- Critzer, F. J., Wintenberg, K. K., South, S.L., & Golden, D.A. (2007). Atmospheric Plasma Inactivation of Foodborne Pathogens on Fresh Produce Surfaces. *Journal of Food Protection*, 70(10), 2290-2296. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.10.2290>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). *Inocuidad y calidad de los alimentos. Preventing E. coli in Food*. Consultado el 14 de abril de 2020. <http://www.fao.org/food/food-safety-quality/a-z-index/e-coli0/es/>.
- Garmendia, G., & Vero, S. (2006). Métodos para desinfección de frutas y hortalizas. *Horticultura*, 197, 18-27. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2153512>
- Hu, M., Chen, J., & Chen, C. (2008). Inactivation of *Escherichia coli* Using Remote Low Temperature Glow Discharge Plasma. *Plasma Science and Technology*, 10(5), 619-622. DOI 10.1088/1009-0630/10/5/18
- Koneman, E. W., Washington, C. W., Stephen, D. A., William M. J, Gary, W. P., Paul, C. S., & Gail L. (2008). *Diagnóstico microbiológico-texto y atlas en color 6ª Edición*. Editorial Médica Panamericana.
- Laribi, B., Kouki, K., M'Hamdi, M., & Bettaieba, T. (2015). Coriander (*Coriandrum sativum* L.) and its bioactive constituents. *Fitoterapia*, 103, 9-26. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.03.012>
- Liao, X., Li, J., Muhammad, A., Suo, Y., Chen, S., Ye, X., Liu, D., & Ding T. (2018). Application of a dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma (Dbd-Acp) for *Escherichia coli* inactivation in apple juice. *Journal Food Science*, 83(2), 401–8. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14045>.
- Man, C., Jeon, Eun, J., Ji, K., Eun, C., Jun, L., Jinsung, C., & Shin, P. (2020). Impact of non-thermal dielectric barrier discharge plasma on *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* and quality of dried blackmouth angler (*Lophiomus setigerus*). *Journal of Food Engineering*, 278, 109952. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109952>.



- Secretaría de Salud. (26 de mayo 1994). *NOM-109-SSA1-1994 Proyecto De Norma Oficial Mexicana, Bienes Y Servicios. Procedimientos para la toma, manejo y transporte de muestras de alimentos para su análisis microbiológico*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881801&fecha=21/09/1995#gsc.tab=0
- Secretaria de Salud. (16 de octubre 1995). *NORMA Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994, Bienes y servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico*. Diario Oficial de la Federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/4883170>
- Secretaria de Salud. (24 de mayo 1995). *Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la Cuenta de microorganismos Coliformes Totales en placa*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4874375&fecha=24/05/1995#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (22 de septiembre 1995). *Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la determinación de Salmonella en alimentos*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4881851&fecha=22/09/1995&cod_diario=209334
- Ocaña, R., Gutiérrez, A., Sánchez, J., Mariezcurrena, M., Laguna, A., Hernández, U., & Rojas, I. (2019). Motility and survival of *Salmonella* Enterica subspecies enterica serovar enteritidis in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L). *International Microbiology*, 22, 363-368. <https://doi.org/10.1007/s10123-019-00059-3>.
- Ordoñez, N. (2010). Cilantro o Coriandro *Coriandrum sativum* L. *TecnoAgro*. <https://tecnoagro.com.mx/no.-60/cilantro-o-coriandro-coriandrum-sativum-l>.
- Organización Mundial de la Salud. (2020). *Inocuidad de los alimentos*. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs399/es/>.
- Rossi, L., Watson, D., Escandarani, S., Miranda, A., & Troncoso, A. (2009). La radiación a la mesa. *Revista chilena de infectología*, 26(4), 318-330. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182009000500003>.
- Šimončicová, J., Kryštofová, S., Medvecká, V., Ďurišová, K., & Kaliňáková, B. (2019). Technical applications of plasma treatments: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 5117-5129. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09877-x>
- Soleno, W. R. (2015). Tecnologías no térmicas en el procesado y conservación de alimentos vegetales. Una revisión. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2(1), 73 – 83. <http://dx.doi.org/10.23850/24220582.172>
- Spector, M.P., & Kenyon, W.J. (2012). Resistance and survival strategies of *Salmonella* enterica to environmental stresses. *Food Research International*, 45(2), 455–481. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.056>



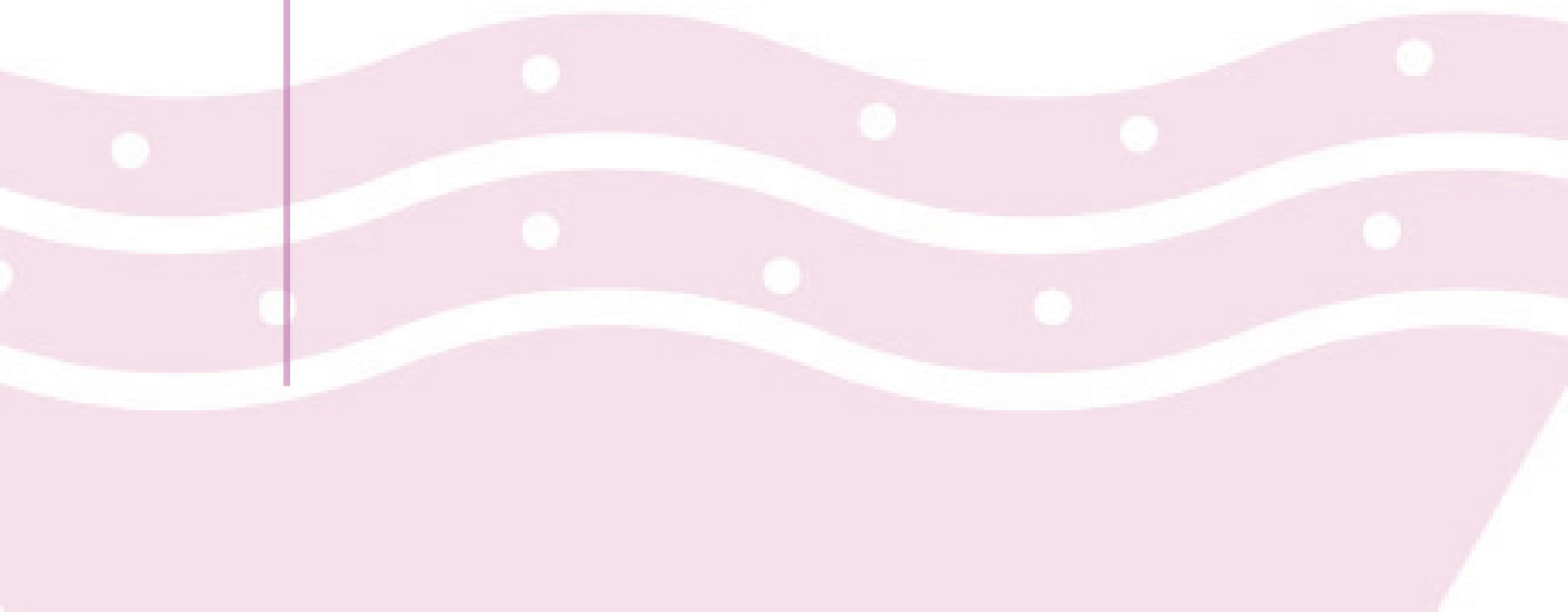
- Takeuchi, K., Hassan, A.N., & Frank, J.F. (2001). Penetration of *Escherichia coli* O157:H7 into lettuce as influenced by modified atmosphere and temperature. *Journal of Food Protection*, 64(11), 1820-1823. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-64.11.1820>.
- Youn, K.B., Hee, K.Y., Hyo, R.Y., Seon, K.H., Park, G., Han, S.H., Choi, E.H. (2013). Feeding-gas effects of plasma jets on *Escherichia coli* in physiological solutions. *Plasma Processes and Polymers*, 10(3), 235-242. <https://doi.org/10.1002/ppap.201200076>.
- Wei, J.N., Liu, Z.H., Zhao, Y.P., Zhao, L.L., Xue, T.K., & Lan, Q.K. (2019). Phytochemical and bioactive profile of *Coriandrum sativum* L. *Food Chemistry*, 286, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.171>.





SOCIEDAD Y SISTEMAS AGROALIMENTARIOS





Pluriactividad y migración: retos a la soberanía alimentaria en la región de Los Petenes, Campeche

Luis Alfredo Arriola Vega^{1*}, Francisco Guízar-Vázquez², Lucio Pat-Fernández², Mirna Isela Vallejo-Nieto³, Pablo Hernández-Bahena², Luvia del C. Padilla-Rebolledo⁴

¹Departamento de Sociedad y Cultura. El Colegio de la Frontera Sur.

²Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente. El Colegio de la Frontera Sur.

³Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad. El Colegio de la Frontera Sur.

⁴Departamento de Vinculación. El Colegio de la Frontera Sur.

*Autor de correspondencia: lariola@ecosur.mx

Palabras clave:

migración, milpa, Petenes, pluriactividad, seguridad alimentaria, soberanía alimentaria

Resumen

El objetivo del artículo consiste en presentar un análisis preliminar sobre los retos para la producción agrícola de autoconsumo en tres comunidades mayas de la zona de Los Petenes, en el norte de Campeche. La viabilidad de la soberanía alimentaria ya no depende exclusiva, o mayormente, del sistema milpa; actualmente los productores rurales se ven empujados a buscar formas de obtener ingresos (pluriactividad) para alcanzar la seguridad alimentaria. Argumentamos que la migración, como parte de la pluriactividad, está jugando un papel cada vez más importante en la seguridad alimentaria y en menor medida en la factibilidad de la soberanía alimentaria. Los resultados muestran que las generaciones actuales favorecen los oficios remunerados, mostrando escaso interés en las labores agrícolas. La subsistencia proviene cada vez menos de la producción directa en el campo y depende más de salarios y remesas, lo que merma la autonomía de las familias rurales para alimentarse de lo que cultivan, pero esos ingresos hacen posible la seguridad alimentaria. El artículo es resultado del proyecto “Diagnóstico sobre pluriactividad y migración en la soberanía alimentaria: caso de estudio en la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche”, el cual se realizó durante los meses de junio a diciembre de 2023.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2), 73-92.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12763675>

Recibido: 19 abril 2024
Revisado: 13 de mayo 2024
Aceptado: 12 julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

Este artículo da cuenta de un estudio exploratorio realizado de junio a diciembre de 2023, en tres localidades mayas de la zona



norte del estado de Campeche, contiguas a la Reserva de la Biósfera Los Petenes. El estudio reveló las condiciones en que se encuentran los sistemas productivos y los desafíos que enfrentan dichos sistemas para satisfacer los requerimientos de autoconsumo de los productores agrícolas. En dicho contexto, la pluriactividad, y como parte de ella la migración, constituye una estrategia que permite a las personas subsistir para lograr la seguridad alimentaria, pero que no siempre y necesariamente para mantener (como si lo fue hasta tiempo reciente) la soberanía alimentaria plena. En este trabajo reivindicamos de manera amplia a la soberanía alimentaria como un ideal a seguir para lograr la mayor autodeterminación posible en la producción (autoabasto) y consumo de alimentos locales en los territorios para, a su vez, conseguir la seguridad alimentaria (véase también, Fernandes, 2017). En contraste, seguridad alimentaria se entiende como la capacidad de las sociedades de abastecer todas sus necesidades alimentarias, independientemente de donde provienen (origen local o foráneo) y cómo se obtienen (autoproducción o compra en el mercado) los alimentos.

Por lo anterior, el presente trabajo abona a la literatura sobre la relación soberanía alimentaria-milpa en la Península de Yucatán (véase, entre otros, Salazar y Magaña, 2016 y Gutiérrez *et al.*, 2019) y a los estudios que abordan el nexo entre la diversificación de actividades productivas (o sea, la pluriactividad) y la autosuficiencia de productores rurales en la misma península (Pat *et al.*, 2010) y en otras partes de México (Mendoza, 2016; Jarquín *et al.*, 2017). La migración es un asunto menos estudiado que los dos ya mencionados: por ejemplo, Cabrera-Araujo y Magaña-Magaña (2021) abordan indirectamente esta temática en un estudio realizado en un entorno semiurbano del estado de Yucatán. Nuestro texto tiene como propósito contribuir a llenar, al menos parcialmente, este último vacío.

La región de Los Petenes, como muchas otras zonas rurales del país, ha sobrellevado cambios históricos que han modificado muchos de los elementos que conforman a la cultura de todos sus habitantes. Dicha población, en su mayoría de identidad maya, se ha integrado progresivamente al resto de la nación mexicana, y hoy en día transitan hacia una globalización de alcance incierto. Debido a un cúmulo de factores históricos, los sistemas agropecuarios y formas de vida tradicionales han sido marginados en favor de las nuevas y cada vez más numerosas opciones que ofrecen un régimen económico abierto a los flujos globales. Los servicios de educación y salud públicos que han beneficiado a la población también les han dado los incentivos para buscar opciones laborales fuera de la esfera de las actividades usuales del área rural. La construcción cada vez más intensiva de vías de comunicación y transporte han facilitado un flujo más copioso para la inserción laboral en actividades agroindustriales, de turismo y de otros servicios que poco o nada tienen que ver con las actividades del campesinado. Las sociedades mayas peninsulares transitan hacia un sistema social más complejo, donde nacen y se consolidan nuevas



formas de clase social, jerarquías, modelos de relación política y, por tanto, nuevas concepciones y referentes culturales de la identidad maya.

Esta gran transición no ha significado el lograr superar las condiciones de pobreza y relativa marginación territorial de la región. Han surgido nuevas problemáticas, como la pérdida de territorio maya por venta o arrendamiento de tierras a la agroindustria, el aumento de la farmacodependencia entre la población joven emigrante, la deforestación desregulada como efecto del aprovechamiento de recursos naturales de alta demanda mercantil y múltiples problemáticas con respecto a la salud por cambios en hábitos nutricionales relacionados al consumo de alimentos industrializados, desintegración familiar e inseguridad pública asociada a la introducción de mega obras como el Tren Maya.

Las poblaciones mayas están enfrentando todos los factores antes mencionados y por ello buscan nuevas alternativas. Ante este panorama, adquiere particular importancia la viabilidad futura del Sistema de Milpa Maya Peninsular (SMMP), piedra angular de la soberanía alimentaria de los mayas y el cual ya ha sido reconocido dentro de la lista de sistemas importantes del Patrimonio Agrícola Mundial de la FAO, institución que refrendó en 2022 su importancia a nivel mundial. Las nuevas generaciones, principales actores involucrados en la pluriactividad —notablemente en la migración— encarnan también el potencial que puede dar continuidad al SMMP, y por tanto a la soberanía alimentaria.

El texto consta de cuatro apartados. El primero introduce el panorama amplio sobre la milpa, la pluriactividad y la migración. En segundo lugar, se presenta la ruta metodológica empleada en el estudio. El tercer apartado da cuenta de los resultados obtenidos y la lectura interpretativa que se hace de la información. Finalmente, exponemos algunas conclusiones derivadas del trabajo realizado.

Milpa, pluriactividad y migración: aspectos generales

Milpa. Cuando decimos milpa maya nos referimos, de manera muy sencilla, al policultivo de semillas de maíz criollo (*Zea mays*), en asociación con frijoles (p. ej., *Phaseolus* sp), calabazas (entre otras, *Cucurbita* sp.) y chiles (verbigracia, *Capsicum annum*) y que en la península se siembran, preferentemente, en suelos de tipo *Tz'ekel* (tipo Leptosol réndzico y lítico, de suelo rojo con estrato pedregoso de material calcáreo, con poca tierra) (Palma y Bautista, 2019). Además, cultivan lenteja (*Lens culinaris*) y flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*), ambas especies introducidas que se han adaptado a las condiciones climáticas y del suelo del territorio (ver Tabla 3). Por diversas razones esta asociación es una praxis nodal para comprender y analizar el modo de vida de las poblaciones en la zona de interés. Se trata de una práctica cultural milenaria desarrollada en gran parte de lo que se conoce como Mesoamérica (territorio que va desde el centro de México hasta Nicaragua), en donde a través de



una manipulación selectiva de semillas se transformó una pequeña espiga, el teocintle (*Zea perennis*), en mazorcas adaptadas para crecer en los climas y suelos más diversos. Se caracteriza por su cultivo con instrumentos rudimentarios, regímenes de rotación espacial y según los ciclos de lluvias de “temporal”. En la península de Yucatán, que comprende los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, la siembra de maíces criollos puede cultivarse con ciertas variedades de frijol (*X'pelón*, *Tz'amá*, *Ib*), calabaza, tales como *Xka'ó xtoop* (*Cucurbita argyrosperma*), *Xmejen k'úum* (*Cucurbita moschata*) y tubérculos, entre ellos el camote (*Ipomea Batatas*), la yuca (*Manihot Esculenta*) y la jícama (*Pachyrhizus Erosus*). Por razones de clima y orografía la Milpa Maya Peninsular se desarrolló siguiendo patrones que la distinguen de modalidades de milpa que se encuentran en otros territorios de Mesoamérica.

El SMMP se ha transmitido de generación en generación y ha logrado remontar las adversidades históricas al considerarse un sistema para la autosubsistencia biológica y cultural, en el que la importancia y potencial económico (valor comercial) del maíz ha sido sólo coyuntural. En el momento histórico actual, donde las demandas del mercado global se presentan cada vez más intensas en la región y el país, la persistencia del maíz como cultivo básico de subsistencia enfrenta muchos desafíos que ponen en peligro su sostenibilidad. En parte, esto tiene que ver con factores como la importación del grano a precios más bajos que el maíz sembrado en México, lo cual desincentiva su producción. Esto explicaría, de alguna manera, por qué la captación de fuerza de trabajo juvenil se orienta a otras actividades laborales y productivas relacionadas con el sistema capitalista global (por ejemplo, y para el caso de Campeche, la industria maquiladora). Con la experiencia de investigación de más de dos décadas del grupo académico Estudios Socioambientales y Gestión Territorial¹ de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), hemos detectado que la conservación del maíz está comprometida, pues el número de personas dedicadas a su cultivo ha disminuido de una generación a otra (Fraga *et al.*, 2015; Schmook *et al.*, 2013; Asturias, 2019). Para darnos una idea más de cómo los campesinos distribuyen su tiempo durante el año sólo en la actividad de la milpa, podemos ver la Figura 1.

¹ Para más información del grupo, revisar la página institucional <https://www.ecosur.mx/grupo/territorial>



Figura 1. Actividades realizadas en la milpa a lo largo del año
Fuente: Elaboración propia

Pluriactividad. Nos interesa destacar que el SMMP es parte de la pluriactividad que actualmente ponen en práctica los mayas de las zonas de interés en este artículo. Por pluriactividad nos referimos a que un grupo familiar rural debe obtener ingresos de diversas fuentes y medios para sobrevivir, incluyendo la migración. El jefe o jefa de familia, y en ocasiones sus hijos, se dedican a varias actividades para generar ingresos. Una parte de su tiempo la pueden dedicar a labores del campo, pero simultáneamente también a la crianza de abejas, elaboración de artesanías o dirigirse a trabajar como asalariados en la pesca. Se trata de actividades complementarias y que, se podría decir, están acopladas dentro del ecosistema local. Hemos documentado que la meliponicultura, la apicultura, huertos de vegetales y frutos, la cría de animales propios en el solar, la artesanía, la cacería “de monte” y la pesca de pulpo se conjuntan para alcanzar la reproducción social y económica, y por supuesto contribuyen a la seguridad alimentaria de los habitantes de la zona adyacente a la RBP (ver Tabla 1 en el apartado “Resultados y Discusión”).

Es importante mencionar que la pluriactividad se ha potenciado porque la infraestructura de servicios (la energía eléctrica), de comunicaciones y transporte y de acceso a tecnologías de la información se ha incrementado en la región. Es decir, la construcción de más y mejores caminos, un mayor acceso a servicios de educación, salud y entretenimiento, ya sean privados o estatales, han posibilitado una mayor movilidad de las personas (por ejemplo, para buscar mejores opciones educativas), pero también para migrar en busca de mejores oportunidades laborales. El uso de teléfonos móviles, de vehículos motorizados y el acceso a internet está muy extendido en toda la región de Los Petenes, haciendo posible mayor flujo de intercambios hacia fuera.



La población maya ha ideado con el tiempo múltiples formas de acceder a ingresos económicos a través de otras actividades que también están inmersas en la dinámica de los mercados, como lo es el ramo artesanal. La elaboración de sombreros de palma de jipi, confección de cordeles y tejidos de una planta conocida localmente como “lengua de vaca” y el labrado de lajas son importantes en determinadas comunidades. En otras también recurren a la pesca por temporada a través de contratos con “cooperativas” artesanales. La combinación de todas estas actividades productivas, junto con los ingresos obtenidos por labores realizadas a raíz de la migración, conforman lo que concebimos como la pluriactividad de la población maya. Otro rubro que sexenio tras sexenio ha cobrado relevancia para la vida rural es el de las políticas asistencialistas, ahora llamadas eufemísticamente como productivistas, mismo que inyecta dinero en efectivo a la economía familiar (Ver Tabla 2, “Resultados y Discusión”).

Migración. El vínculo de las familias mayas con el trabajo asalariado, tanto interno como local, y con la migración, ha variado a través del tiempo dependiendo de la evolución general de la economía (Schüren, 2003). Entre 1930 y 1940 los habitantes de esta región se emplearon en la extracción de resina de chicozapote (*Manilkara zapota*) para la elaboración de chicle. En la década de 1960 la gente salió para contratarse en la construcción de carreteras y edificios públicos. Dos décadas más tarde, con el crecimiento urbano, la industrialización, el turismo y el auge petrolero, se incrementó la movilidad de mano de obra del campo a la ciudad. En el área de estudio detectamos que actualmente existe migración interna (la movilidad que se da dentro de un territorio distante al hogar de residencia) y, en menor medida, migración externa, considerada como la movilidad que se realiza fuera del país. Estos aspectos se tratan con detalle en el apartado “Resultados y Discusión”.

Métodos

Para conocer de forma dialogada las características de la pluriactividad, la migración y los retos que enfrentan los mayas, se realizó un estudio preliminar en comunidades colindantes de los municipios de Hecelchakán, Calkiní y Tenabo, situados al noroeste del estado de Campeche, en la proximidad de la RBP (Figura 2). La fase de trabajo en campo del estudio se realizó entre agosto y octubre de 2023 y comprendió la realización de entrevistas, observación participante y dos talleres participativos en los que colaboraron 16 mujeres y 13 hombres. El objetivo de ambos talleres fue analizar las actividades productivas, la migración y la alimentación de la población aledaña a la RBP. De manera específica, el primer taller buscaba identificar las principales actividades productivas que sostienen la economía familiar y las problemáticas que enfrentan, así como estimar los ingresos y egresos de la población y su relación con la soberanía alimentaria. El segundo taller buscó identificar la diversidad alimentaria local, las fuentes de obtención de alimentos y la

frecuencia de consumo de alimentos de la población en las localidades de estudio (ver imágenes de los talleres en Figura 3). En este taller también se indagó sobre la migración interna y externa. Las personas asistentes a ambos talleres eran socios o directivos de las siguientes organizaciones: Servicios Ecoturísticos Ecotankuché (Calkiní), Corchadores de Sansevieria de Tankuché (Calkiní), SPR Hombre Maya, SPR Herencia Maya (Hecelchakán), Mak Jobon (Calkiní), Humpel Tumben (Calkiní) y Campesinos Maiceros de Tenabo.

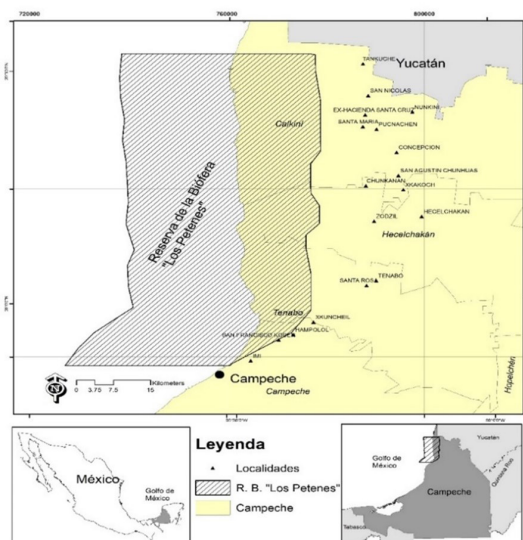


Figura 2. Mapa del área de estudio
Fuente: Elaborado por Rodimiro Ramos Reyes



Figura 3. Imágenes de Talleres Participativos con integrantes de organizaciones de Calkiní, Hecelchakán y Tenabo
Fuente: Archivo fotográfico

La información generada fue sistematizada y con ella se elaboraron memorias de los talleres para devolver los resultados a las autoridades de cada comunidad. Los datos obtenidos revelaron la forma en que las actividades productivas de autoabasto, los subsidios gubernamentales, otros ramos productivos y los ingresos derivados



de la migración ofrecían un panorama que puede dar pistas sobre la situación de la soberanía alimentaria en esta zona.

Resultados y Discusión

A continuación, se describe el panorama de algunas de las actividades productivas según lo recabado a través de los talleres con las y los colaboradores provenientes de Calkiní, Hecelchakán y Tenabo. Se complementan estos resultados con información de fuentes secundarias, concretamente estadísticas oficiales sobre el tema de migración.

Milpa tradicional y el solar. La milpa y los solares constituyen dos agrosistemas que proporcionan alimentos para el autoabasto y con los excedentes de producción proveen ingresos para las comunidades colindantes con la RBP. En el cultivo asociado de maíz-calabaza-frijol en las comunidades colindantes a la reserva Los Petenes se obtiene un rendimiento promedio por hectárea de 500 kg de maíz, 100 kg de calabaza, 50 kg de frijol (Pat *et al.*, 2024). En este sistema agrícola se documentó que cultivan 16 especies de plantas, 14 nativas, como ya se mencionó: cuatro tipos son maíces, cuatro de frijoles, tres de calabazas nativas y tres de tubérculos. Los maíces nativos se destinan para consumo humano y animal de traspatio; las especies de frijoles, calabazas y tubérculos, para el consumo y la venta. De esta manera, la milpa es fuente esencial de carbohidratos y proteína vegetal. Las especies de plantas de la milpa constituyen un bien común que han intercambiado y/o seleccionado los productores año tras año y por generaciones.

Como parte del sistema del solar, los participantes de los talleres identificaron 20 especies de frutas, seis especies de verduras y siete especies de animales (Tabla 3). De las frutas, el 60% se destina al consumo familiar y 40% restante a la venta. Las verduras son para consumo doméstico y las especies animales se destinan tanto al consumo como a la venta: dos son exclusivas para la venta. Así, las frutas y verduras del solar son la fuente principal de vitaminas y minerales, y las especies animales proveen proteína.

En los talleres se realizó el ejercicio por el que se enlistaron los productos que se consumen diariamente durante una semana. Para determinar el origen de los productos consumidos se dividieron en tres categorías: las producidas (P), las compradas (C) y las que parcialmente se compran y producen (CYP). De esta forma, se contabilizó que en el grupo de Granos y Cereales cuatro se producen, seis se compran y dos se compran y producen; en el grupo de productos de Origen Animal se produce uno, se compran siete y se compran y producen tres; en la categoría de los Productos Industrializados todos se compran (11 artículos); para el grupo de Frutas y Verduras 11 se producen, cinco se compran y uno se compra y produce.

Apicultura y meliponicultura. En la región se trabaja la apicultura y la meliponicultura. La primera se refiere a la producción de miel de abejas de la variedad *Apis*



mellifera, la segunda, es la cría, manejo y reproducción orientada a la obtención de mieles de abejas nativas, conocidas popularmente como meliponas. La meliponicultura ha cobrado nuevos bríos en los tres municipios de interés debido a la mayor demanda por parte de mercados externos a la Península, fenómeno impulsado por una mayor difusión de sus bondades medicinales y cosméticas en sectores de población con alto poder adquisitivo. La meliponicultura se desarrolla en los traspacios de las casas. Los tipos de meliponarios se establecen en función de la capacidad de trabajo (cantidad de mano de obra disponible), capitalización y recursos diversos con que cuentan quienes se dedican a ello. Quienes sólo cuentan en el traspacio con una cantidad limitada de *jobones* (troncos ahuecados en los que se forma la colmena) se limitan a vender la miel a granel a intermediarios regionales o extranjeros; aunque también aprovechan otros productos derivados como la cera, la cual se vende a fabricantes de velas. Las personas que se organizan en sociedades trabajan en busca de inyectar valor agregado al producto, es decir, a su procesamiento para producir cosméticos, ungüentos medicinales, gotas oftálmicas y jabones. La apicultura y la meliponicultura son sensibles tanto a las sequías prolongadas como al exceso de lluvias ya que afectan los patrones de floración y, por lo tanto, a la producción (ver Tabla 4).

Artesanías. En localidades de Calkiní se realiza la fabricación de artículos cuya materia prima son dos tipos de plantas: palma de *jipi* (*Carludovica palmata*) y “lengua de vaca” o “machete” (*Sansevieria trifasciata*). La primera destaca por el grado de especialización que demanda su elaboración y las horas que deben invertir las personas artesanas en el aprendizaje y la elaboración de productos (sombleros, bolsas, abanicos de mano, entre otras). Es una actividad que en los últimos años ha padecido diversas adversidades como las variaciones del clima, precios deprimidos y frágil organización social (ver Tabla 4). La segunda sirve para la producción de sogas y cordeles. Durante la pandemia de COVID-19 se limitó gravemente la compraventa de estos productos y, posterior a la misma, su recuperación se ha visto mermada por la entrada al mercado regional de sombleros provenientes de China, confeccionados con fibras sintéticas que imitan a las naturales y que son de menor precio.

Pesca. Al norte de Calkiní, en el litoral marino de la RBP, la actividad de la pesca artesanal es sumamente relevante para la población maya. Milperos, apicultores, meliponicultores y artesanos trabajan como pescadores de temporada para complementar sus ingresos anuales. Sin embargo, se vislumbra una sobreexplotación de los recursos pesqueros de la zona, con lo cual los ingresos por dicha actividad se ven reducidos (ver Tabla 4).

La mirada general a la pluriactividad en comunidades próximas a la RBP revela, en su conjunto y dinámica, algunos de los principales factores por los cuales el sector joven de población maya opta por dedicarse a cultivos comerciales – eso es si



cuentan con acceso a tierras- u optan por emigrar en búsqueda de mejores ingresos y oportunidades materiales de vida, abandonando progresivamente la práctica del SMMP. La siguiente sección profundiza en este tema. Para visualizar los principales datos obtenidos en este trabajo, y de manera complementaria a la narración de resultados, incluimos varias tablas que ilustran ese panorama.

Tabla 1. Principales actividades productivas realizadas en un año en Hecelchakán, Tenabo y Calkiní (comunidades adyacentes a la Reserva de la Biósfera de Los Petenes)

Actividades Productivas	Meses												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Milpa	Cosecha			Preparación terreno	Siembra	Control hierbas, insectos, cuidado del cultivo de aves y mamíferos						Cosecha	
Apicultura				Cosecha y división	Cosecha y división					Revisión y alimentación			
Meliponicultura			Revisión	Cosecha y división	Revisión de divisiones					Revisar	Cosecha		
Pesca			Primera temporada: pesca de escama							Segunda temporada: pesca de pulpo			
Artesanías			Cultivo de palma, selección y preparación de materiales, tejido										
Traspatio			Animales domésticos, frutas y verduras del traspatio										

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 1 evidencia la existencia de variadas actividades distribuidas a lo largo del año entre los habitantes de las comunidades adyacentes a la RBP.

Tabla 2. Ingresos brutos estimados por actividades productivas y subsidios reportados en 2023 por habitantes de comunidades adyacentes a la Reserva de la Biósfera de Los Petenes

	Rubro	Ingresos anuales aprox. (pesos)
Actividades Productivas	Milpa	6,000
	Apicultura	31,500
	Meliponicultura	20,300
	Artesanías	49,900
	Pesca	52,000
Subsidios de gobierno	Solar	9,070
	Productivos	84,000
	Sociales	56,000

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se puede apreciar una estimación de los ingresos derivados de actividades laborales y los montos de los subsidios gubernamentales, según reportaron las personas que colaboraron en este sondeo.



Tabla 3. Diversidad de plantas y animales en el solar y milpa maya

Consumo y/o venta	Provenientes del solar			Provenientes de la milpa	
	Frutas	Verduras	Animales	Granos	Verduras
Consumo y/o venta	Naranja agria y dulce	Hierbabuena	Patos	Maíz Blanco o <i>Xnuc-Nal</i>	
	Mandarina	Cebollín		Maíz Amarillo o <i>Kan-Nal</i>	
	Toronja	Epazote		Maíz Rojo o <i>Cha-Chop</i>	
	Anona	Cilantro		Maíz Morado o <i>Eju</i>	
	Mamey	Chaya			
	Zapote	Rábano			
	Plátano				
	Caimito				
	Chayote				
	Pepino				
Consumo doméstico	Tomate				
	Tamarindo				
	Limón		Gallinas	Frijol <i>Ibe</i>	Yuca
	Ciruela		Pavos	Frijol <i>Xpelon</i>	Camote
	Guanábana		Puercos	Frijol <i>XKoli bu'ul</i>	Jícama
	Huaya		Meliponas	Lenteja	Jamaica
	Mango				Calabaza <i>Xmejen K'uun</i>
Consumo y venta	Chile				Calabaza <i>Xnuk K'uun</i>
	Sandía				
Venta			Borregos		
			Reses		

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3 nos muestra que de los 52 productos que se consumen cotidianamente, el 55.8% se compra, el 32.7% se producen y el 11.5% se compran y producen. Una parte significativa de los alimentos en los grupos de “Frutas y Verduras” y “Granos y Cereales” provienen de la milpa y del solar; también hay un consumo significativo de alimentos de origen animal.

Tabla 4. Identificación de problemáticas por tipo de actividad productiva

Actividad Productiva	Problemáticas identificadas por participantes
Milpa	Alto costo de insumos y bajo precio de venta del producto
	Lluvias irregulares, fechas tardías de siembra y bajo rendimiento
	Envejecimiento de milperos sin remplazo generacional
Apicultura	Bajo precio de la miel
	Baja floración por cambios en la temporada de lluvias o sequías prolongadas
Meliponicultura	Robo de colmenas
	Disminución de floración
Artesanía	Bajos precios de venta de productos
	Débil organización social
	Falta de capacitación
	Épocas de lluvias se daña y escasea la materia prima



Pesca	Baja captura de especies marinas durante la temporada de pesca
	Robos de motores de lancha con violencia
	Bajo precio de producto y alto costo de la gasolina

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 muestra las dificultades que se mencionaron por parte de los y las colaboradoras y que tienen una incidencia, directa e indirecta, en la soberanía y la seguridad alimentarias.

En la siguiente sección discutimos el fenómeno migratorio de la zona y las razones que estimulan a la población a migrar con base en los resultados obtenidos. También se analiza el papel que la migración juega como parte de la pluriactividad de la población en la región y se reflexiona sobre las implicaciones que esta tiene en el tipo de ruralidad que se vislumbra en el campo mexicano. Es importante señalar que no existen datos oficiales desagregados a nivel de municipios ni de localidades sobre el tema. Tampoco se ha realizado investigación reciente al respecto en los municipios objeto de interés en este estudio. Por ende, la caracterización inicial y parcial de los procesos de migración que detectamos con los habitantes de las comunidades aledañas a la RBP constituye un primer esfuerzo por llenar algunos de esos vacíos.

Migración. Para dimensionar el fenómeno migratorio contemporáneo desde Campeche, las estadísticas del último Censo de Población y Vivienda (2020) indican que emigraron para residir en otra entidad 44,034 personas en algún momento entre 2015 y 2020 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, s.f.). En ese período, de cada 100 campechanos que emigraron, 33 fueron a Yucatán, 21 a Quintana Roo, 11 a Tabasco, 8 a Veracruz y 3 a Chiapas. En el mismo lapso salieron 2,499 personas (0.3%) para vivir en otro país: 64 de cada 100 fueron a los Estados Unidos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía s.f.). En 2023 Campeche era una de las entidades con menor índice de expulsión de migrantes internacionales porque ocupaba el lugar 28 a nivel nacional entre todos los estados de la República (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023), pero en la región de Los Petenes, el fenómeno ha ido creciendo en intensidad.

La migración desde la zona de estudio. Con la información generada en los talleres y en las entrevistas realizadas, se pudo observar y confirmar los datos que arroja el último Censo de Población y Vivienda (2020): la migración en Calkiní, Hecelchakán y Tenabo es mayormente local y regional. La emigración al extranjero es minúscula. La mayor parte de las personas que se desplazan realizan lo que se llama migración pendular. Es decir, la gente va de su lugar de residencia al lugar de trabajo, de ida y vuelta en el mismo día, o una semana, o por mes (Cabrera-Araujo & Magaña-Magaña, 2021). El rango de edad de quienes migran es entre 18 y 50 años. A continuación, ofrecemos un testimonio al respecto:



[...] voy a hablar de Tenabo, en enero emigran tanto hombres como mujeres, [de] entre 22 y 40 años, muchos de mis vecinos se van al Carmen, a Mérida, Carrillo Puerto, Cancún, se van a la Península. Casi no hay los que van al extranjero [...] salen muchos maestros, albañiles y pescadores... [sic]. (Hombre, Campesinos Maiceros de Tenabo, 58 años, comunicación personal)

Hombres y mujeres participan en la migración, pero se distinguen diferencias en las clases de ocupaciones. Las mujeres que migran laboran en maquilas y servicio doméstico, por ejemplo. Los hombres realizan trabajos en diversidad de ramos: servicios (limpieza, alimentos, vigilancia, jornaleros, entre otros), así como pesca, albañilería y carpintería. Esta situación no es nueva, ya ha sido documentada por Pat *et al.* (2010); nuestros hallazgos reiteran que continúa vigente. En palabras de un colaborador:

[...] hay personas que salen [para trabajar en el oficio] de albañil, de carpintería en otras comunidades. Las señoras de amas de casa van a Mérida a trabajar, hay quienes se van a la isla [Isla Arena] a la temporada de pulpo. Más del 80 por ciento [que] se van a la isla son puros hombres, mujeres no pueden ir porque es tiempo de pulpo[...] [Ellas] van en la maquiladora [...] entran dos o tres camiones, los de Tenabo van a la maquila, si van a una maquila, esta es de Calkiní [...]. Entra [un autobús] de Halachó y uno de Calkiní, más aparte los que se van de Mérida... [sic]. (Hombre, SPR Herencia Maya, Hecelchakán, 63 años, comunicación personal)

Como revela el relato anterior, algunos destinos incluyen Poxilá, Halachó, Tepakán (los tres en Yucatán), Ciudad del Carmen, Mérida, Cancún, Playa del Carmen y otros puntos de la Riviera Maya. La Tabla 5 presenta el consolidado de una consulta rápida entre seis participantes de los talleres realizados para este diagnóstico. Esta información confirma y amplía lo ya expresado en párrafos anteriores. Para su elaboración se preguntó a los y las colaboradores (identificados con pseudónimos) que mencionaran a miembros de su familia inmediata y conocidos que han migrado por razones laborales. La lista no pretende ser exhaustiva, es más bien ilustrativa. Se reitera que es una primera aproximación a la migración desde las comunidades de interés.



Tabla 5. Familiares y conocidos migrantes de participantes en taller con socios y directivos de organizaciones locales en Tenabo, Hecelchakán y Calkiní

Nombre del o la colaboradora y grupo al que pertenece	Tipo de relación con colaborador	Lugar de procedencia	Lugar de destino (migratorio)	Ocupación o actividad que realiza	¿Cuánto tiempo lleva laborando?	Frecuencia con la que va y viene y/o regresa
Macario, "Maiceros de Tenabo"	Hijo 1	Tenabo, Campeche	Champotón, Campeche	Maestro	10 años	Cada siete días
	Hijo 2	Tenabo, Campeche	Candelaria, Campeche	Maestro	25 años	Cada siete días
	Nuera	Tenabo, Campeche	Escárcega, Campeche	Maestra	7 años	Cada siete días
	Primo	Tenabo, Campeche	Frontera, Tabasco	Maestro	20 años	Cada 15 días
	Conocido 1	Tenabo, Campeche	Mérida, Yucatán	Albañil	20 años	Cada siete días
	Conocido 2	Tenabo, Campeche	Candelaria, Campeche	Maestro	25 años	Cada siete días
	Conocido 3	Tenabo, Campeche	Calkiní, Campeche	Enfermero	10 años	Viaja diariamente
	Conocida 1	Tenabo, Campeche	Campeche, Campeche	Empleada de oficina	5 años	Viaja diariamente
	Conocida 2	Tenabo, Campeche	Campeche, Campeche	Dependiente en negocio	15 años	Viaja diariamente
Modesto, "Sociedad Productiva Rural Herencia Maya"	Hijo 1	Hecelchakán, Campeche	Calakmul, Campeche	Maestro	13 años	Cada 15 días
	Nuera	Hecelchakán, Campeche	Escárcega, Campeche	Maestra	13 años	Cada 15 días
	Conocido 1	Hecelchakán, Campeche	Mérida, Yucatán	Albañil	20 años	Cada siete días
	Conocido 2	Hecelchakán, Campeche	C. del Carmen, Camp.	Albañil	Por temporadas	variable
	Conocido 3	Hecelchakán, Campeche	Cancún, Quintana R.	Albañil	Por temporadas	Variable
	Conocida 1	Hecelchakán, Campeche	Cancún, Quintana R.	Afanadora en hotel	Por temporadas	variable
	Conocido 4	Hecelchakán, Campeche	Cancún, Quintana R.	Electricista	10 años	Cada 15 días
Selma, "Servicios Ecoturísticos Ecotankuché"	Prima 1	Tankuché, Calkiní	Halachó, Yucatán	Operaria en maquiladora	3 años	Viaja diariamente
	Conocido 1	Tankuché, Calkiní	Halachó, Yucatán	Operario en maquiladora	4 años	Viaja diariamente
	Prima 2	Tankuché, Calkiní	Cancún, Quintana R.	Empleada del hogar	20 años	s/d
	Prima 3	Tankuché, Calkiní	Cancún, Quintana R.	Empleada del hogar	20 años	s/d
	Primo 1	Tankuché, Calkiní	Mérida, Yucatán	Técnico en TIC	4 años	s/d
	Primo 2	Tankuché, Calkiní	Umán, Yucatán	Empleado en empresa porcícola	2 años	s/d
	Conocido 2	Tankuché, Calkiní	Halachó, Yucatán	Operario en maquiladora	3 años	Viaja diariamente



Odilio, Comisario eji- dal (Tankuché)	Hijo 1	Tankuché, Calkiní	Mérida, Yu- catán	Empleado en negocio	6 meses	s/d
	Hijo 2	Tankuché, Calkiní	Mérida, Yu- catán	Empleado en negocio	1 año	s/d
	Hijo 3	Tankuché, Calkiní	Escárcega, Campeche	Maestro	10 años	s/d
	Primo	Tankuché, Calkiní	Cancún, Quintana R.	Empleado de hotel	15 años	s/d
Gustavo, "Corchadores de Sanseveria"	Hija 1	Tankuché, Calkiní	Chetumal, Quintana R.	Empleada del hogar	10 años	s/d
	Hija 2	Tankuché, Calkiní	Halachó, Yucatán	Operaria en maquiladora	8 años	Viaja diaria- mente
Fulgencio, "Humple Tum- ben"	Hijo 1	Tankuché, Calkiní	Umán, Yucatán	Empleado en empresa porcícola	2 años	s/d
	Hijo 2	Tankuché, Calkiní	Halachó, Yucatán	Taxista	1 año	Viaja diaria- mente

Fuente: Elaboración propia

La migración al extranjero, aun de poca magnitud, es principalmente a Canadá bajo el esquema del Programa de Trabajadores Agrícolas Temporales México-Canadá (PTAT). Para ejemplificar la migración bajo el esquema del PTAT la Tabla 6 ofrece datos correspondientes a 2022, obtenidos de una fuente oficial. En menor medida hay personas, principalmente varones, que han emigrado a Estados Unidos, de manera no autorizada. Las personas que migran por razones laborales envían remesas a sus parientes. Estos recursos se destinan principalmente a la alimentación, a la salud y a la educación de los grupos familiares. Las personas que emigran al extranjero invierten, además de lo ya indicado, en mejoras al hogar. Esto concuerda con lo encontrado en otras investigaciones en la región (Cen, 2012), las cuales indican que los recursos se dirigen mayormente a cubrir gastos básicos de hogar.

Tabla 6. Número de personas residentes de Calkiní y Hecelchakán colocados en el PTAT, año 2022

Municipio	Número de trabajadores
Calkiní	107
Hecelchakán	86
Otros casos*	10

Fuente: Adaptado de Secretaría de Gobernación-Unidad de Política Migratoria (2022)

*Nota: la fuente sólo incluye los municipios de la entidad con mayor número de laborantes (Calkiní, Campeche, Hecelchakán, Hopelchén, Escárcega y Calakmul). El renglón "Otros casos" contiene a trabajadores de los municipios restantes, incluyendo a Tenabo. El total de trabajadores que reporta la fuente para todo el estado suma 402 personas.

Las causas para migrar. Tal como ya se dejó entrever, las actividades agrícolas (agricultura, ganadería, apicultura, forestería, entre otras), por sí solas, difícilmente representan opciones viables para sobrevivir, para alcanzar un nivel de vida digno o incluso para mejorarlo. Aun cuando se disponga de los recursos para hacerlo, la inversión de capital, tiempo y trabajo necesarios para producir exitosamente no



otorga certeza de que el resultado sea favorable y redituable. Incluso la miel, producto explotado ampliamente en la región, está sujeto a los vaivenes de los precios. El maíz, un producto de primera necesidad, no es rentable hoy en día por varias razones, entre ellos precios de las semillas, rendimientos decrecientes, agotamiento de suelos por falta de rotación o sobreexplotación, entre otros. Resulta más barato importarlo que producirlo. Eso desincentiva su cultivo tanto para el autoconsumo como para su venta. Además de lo anterior, también existen otros agentes y factores que hacen poco rentable y atractiva las actividades agrícolas. Pensemos, por ejemplo, en los llamados coyotes (intermediarios) y en las fuerzas del mercado que influyen tanto en los precios siempre crecientes de los insumos: semillas, abonos, entre otros (Canché, 2022). A lo anterior hay que sumar lo impredecible que son hoy en día las condiciones climáticas: temporadas de lluvias alteradas, con poca o mucha precipitación, ciclos de sequías prolongados o de muy elevadas temperaturas que provocan fuertes pérdidas en los cultivos. Un factor adicional, pero que resulta complicado escudriñar, es la fragmentación de la propiedad. No hay suficiente tierra para los herederos de un agricultor con una familia numerosa. Al fraccionarse un inmueble en muchos predios el tamaño de las parcelas resultantes las hace unidades económicas inviables para la milpa, no necesariamente para otras actividades (por ejemplo, apicultura). Finalmente, hay que considerar un agente de índole cultural. La mundialización imperante presenta a las nuevas generaciones imaginarios sobre un estilo y nivel de vida deseables —principalmente material— a través de modernas tecnologías de la información, entre ellas los equipos de cómputo y teléfonos inteligentes. Las opciones laborales disponibles en las localidades rurales difícilmente pueden hacer posible alcanzar ese ideal (Ramírez Carrillo, 2006). A través de las redes sociodigitales el resto del mundo es un pañuelo abierto en el cual aparecen formas y modos de vida a los que una persona joven aspira. El ansia de satisfacer el nivel de consumo y la obtención de bienes materiales que muestran esos imaginarios inducen a los jóvenes a buscar cómo materializar ese sueño fuera de sus comunidades.

Efectos de la migración: ¿hacia una “nueva” ruralidad? Planteamos una idea que no es nueva, pero que ha tomado mayor fuerza con el paso del tiempo: la migración es una estrategia que forma parte de la pluriactividad que induce una ruralidad cambiante en el campo mexicano (ver, entre otros, Appendini & Torres, 2018; Jarquín *et al.*, 2017). Bajo las condiciones imperantes en el norte de Campeche se percibe que el peso de las actividades agropecuarias en la subsistencia y reproducción familiar ha disminuido y que existe una tendencia a que los salarios obtenidos en empleos no rurales constituyan el pilar que sostiene a las familias en comunidades como las que están ubicadas en la proximidad de la Reserva de la Biósfera de Los Petenes. Ante los limitados apoyos gubernamentales a las actividades agrícolas, la falta de interés de



la juventud de continuar con las actividades agropecuarias, el envejecimiento de los productores agrícolas (Vizcarra Bordi *et al.*, 2015), el cambio de la dieta en poblaciones rurales de alimentos producidos localmente a comida procesada (Otero Prevost *et al.*, 2017) y la diversificación de las actividades económicas en las zonas rurales, existe el riesgo de que los sistemas tradicionales y ancestrales, como lo es el SMMP, no persistan y con ello se esté poniendo en riesgo la soberanía alimentaria en un entorno adverso a un modo de vida que hasta hace poco era autosostenible. La diversidad de problemáticas a las que deben hacer frente los productores para desarrollar diversas actividades en la zona induce a la población a otras vulnerabilidades sociales, económicas y culturales lo que, a su vez, está impactando negativamente la seguridad alimentaria (Lazos-Chavero & Jiménez-Moreno, 2022).

Conclusiones

La viabilidad del SMMP, y con ello la soberanía alimentaria, tal como la conocemos entre poblaciones mayas del norte de Campeche, enfrenta tres problemas concretos. Primero, la ausencia de relevo generacional para continuar produciendo en el campo, principalmente la milpa, quizás el problema más acuciante. Esto tiene que ver con el hecho de que las y los jóvenes están cambiando sus modos de vida, de ser milperos a la de ser agricultores comerciales, trabajadores migrante estacionarios (o temporales), jornaleros, asalariados o una combinación de dos o tres de estos rubros. En ese sentido, la migración abre un horizonte de oportunidades que compromete la continuidad de la milpa porque las nuevas generaciones se inclinan más por las actividades remuneradas no agrícolas. Segundo, los costos de los insumos para las actividades del campo están siempre en aumento, con poco o deficiente apoyo gubernamental para superar este problema. No se avizora que esta situación cambie en el corto y mediano plazo. Tercero, el impacto del cambio climático, fenómeno cuyos efectos son progresivamente más agudos y que por ende han complicado en extremo la de por sí extenuante labor en torno al sistema de la milpa. Podríamos afirmar que los ingresos obtenidos por actividades que realizan los migrantes son complementarios a los ingresos que las poblaciones en la adyacencia de la RBP obtienen a través de la pluriactividad. Nos falta profundizar aún cuál es la relevancia de esos ingresos monetarios obtenidos vía la migración dentro del total de ingresos familiares y su aportación a la seguridad alimentaria. En última instancia, la seguridad alimentaria, en contraste con la idea de soberanía alimentaria, garantiza tener los recursos para la alimentación básica, mas eso no implica que dichos alimentos sean nutritivos, es decir que las personas coman sanamente. En síntesis, el debilitamiento de lo que se produce en la milpa tradicional y en los solares, el envejecimiento de los productores dedicados a esos sistemas, la migración de hombres y mujeres jóvenes, la baja



productividad de los suelos y el clima errático son factores que están reduciendo la soberanía alimentaria de las familias y aumentando la dependencia del mercado para la adquisición de alimentos.

Este panorama nos hace plantear algunas interrogantes sobre problemáticas que detectamos en nuestro trabajo. ¿Está contribuyendo la pluriactividad a la “desagrarización” del campo mexicano? En caso afirmativo, ¿cuáles son los escenarios posibles que enfrentan las comunidades ante dicho proceso? ¿Qué tipo de ruralidad se vislumbra cuando esta depende del salario urbano para su continuidad? ¿Qué cambios a largo plazo acarrea la migración campo-ciudad, particularmente la de la población joven, en un contexto como el que se vive en el norte de Campeche? ¿Qué factores de expulsión están determinados por un entorno actualmente adverso que sólo permite satisfacer ciertas necesidades de los habitantes de la región y que conlleva a que las personas decidan migrar? ¿Cómo pueden ser atendidos estos factores en la planeación y política pública de la región? ¿Qué implicaciones tiene para la agrobiodiversidad y la soberanía de los pueblos indígenas? Ofrecer respuestas a estas y otras preguntas es una tarea pendiente para futuras investigaciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la convocatoria 2023 “Fondos Semilla” de ECO-SUR con el proyecto ESIM 51051 “Diagnóstico sobre la pluriactividad y migración en la soberanía alimentaria: Caso de estudio en la Reserva Los Petenes, Campeche.”

Agradecimientos

Las y los autores deseamos agradecer el tiempo e interés que prestaron las personas de las localidades de Hecelchakán, Tenabo y Calkiní asistentes a los talleres comunitarios. Esperamos que los resultados contribuyan a comprender las dinámicas de su entorno y mejorar su calidad de vida.

Referencias

- Appendini, K., & Torres-Mazuera, G. (eds.) (2008). *¿Ruralidad sin agricultura?* El Colegio de México.
- Asturias, M. (2019). *El abandono diferencial de la milpa en dos ejidos del Estado de Yucatán* [tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur]. Repositorio institucional Ecosur. <https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2170>



- Cabrera-Araujo, Z. M., & Magaña-Magaña, M. Á. (2021). Migración pendular y seguridad alimentaria en pequeñas comunidades semiurbanas de Mérida, Yucatán: Caso Cheuman. *Estudios sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 31(58), e211142. doi.org/10.24836/es.v31i58.1142
- Canché, G. E. (2022). La milpa maya y su contribución a la soberanía alimentaria. *Diversidad*, 22(1), 103-109.
- Cen, M. (2012). Remesas y estructura del gasto en los hogares receptores: caso de estudio de una comunidad maya contemporánea. *Análisis Económico*, 27(64), 5–21. <https://analisiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/204/195>
- Fernandes, B. M. (2017). Territorios y soberanía alimentaria. *Revista Latinoamericana de Estudios Rurales*, 2(3), 22-38. <https://ojs.ceil-conicet.gov.ar/index.php/revistaalasru/article/view/114>
- Fraga, J. & Arias, L. M. (2015). Milperos o Turisteros. Opciones laborales de los jóvenes maya-yucatecos contemporáneos. *Teoría y Praxis, Número especial*, 174-196. http://www.teoriaypraxis.uqroo.mx/doctos/especial_marzo15/Fraga%20y%20Arias.pdf
- Gutiérrez, M., Magaña, M., Zizumbo, D. & Ballina, H. (2019). Diversidad agrícola y seguridad alimentaria nutricional en dos localidades Mayas de Yucatán. *Acta universitaria*, 29,1-14.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). *Porcentaje de la población emigrante internacional a los Estados Unidos de América. Migración. Información General*. <https://www.inegi.org.mx/temas/migracion/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (s.f.). *Cuéntame de México. Movimientos migratorios. Campeche*. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/poblacion/m_migratorios.aspx?tema=me&e=04
- Jarquín, N. H., Castellanos, J. A., & Sangerman-Jarquín, D. Ma. (2017). Pluriactividad y agricultura familiar: retos del desarrollo rural en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4), 949-963. doi.org/10.29312/remexca.v8i4.19
- Lazos-Chavero, E., & Jiménez-Moreno, M. (2022). Vulnerabilidades rurales a partir del envejecimiento entre nahuas del sur de Veracruz. *Trace. Travaux et Recherches dans les Amériques du Centre*, 81, 132-161. <https://doi.org/10.22134/trace.81.2022.803>
- Otero Prevost, D. E., Gurri, F. D., Mariaca, R. & Guízar, F. (2017). La incorporación y el aumento de oferta de alimentos industrializados en las dietas de las unidades domésticas y su relación con el abandono del sistema de subsistencia propio en las comunidades rurales mayas de Yucatán, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 14(80), 1-16. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr14-80.iaoa>
- Palma, D., & Bautista, F. (2019). Technology and local wisdom: The Maya soil classification app. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(2), 249-260.



- Pat, L., Hernández, P. y Guizar, F. (2024). *Guía para la producción y conservación de semilla de maíces nativos territorio Hecelchakán-Calkiní, Campeche*. Secretaría de Agricultura: Proyecto estratégico: desarrollo de territorios rurales con productores que custodian maíces nativos en México. Manuscrito.
- Pat, L., Nahed, J., Parra, R., García, L., Nazar, A. & Bello, E. (2010). Impacto de las estrategias de ingresos sobre la seguridad alimentaria en comunidades rurales Mayas del norte de Campeche. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 60(1), 48-55.
- Ramírez Carrillo, L. A. (2006). Impacto de la globalización en los mayas yucatecos. *Estudios de Cultura Maya*, 27(1), 73-97. <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.2006.27.103>
- Salazar, L., & Magaña, M. (2016). Aportación de la milpa y traspatio a la autosuficiencia alimentaria en comunidades mayas de Yucatán. *Estudios sociales*, 24(47), 182-203.
- Schmook, B., van Vliet, N., Manzón-Che, M. J. & McCandless, S. (2013). Persistence of swidden cultivation in the face of globalization: a case study from communities in Calakmul, Mexico. *Human Ecology*, 41(1), 93-107. DOI:10.1007/s10745-012-9557-5
- Schüren, U. (2003). Reconceptualizing the post-peasantry: household strategies in Mexican ejidos. *Revista Europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe*, 75(1), 47-63. DOI: 10.18352/erlacs.9693
- Secretaría de Gobernación-Unidad de Política Migratoria (2022). *Trabajadores Agrícolas Temporales México-Canadá (PTAT). Cuadro 1.6. Según principales municipios de residencia, 2022*. http://www.politicamigratoria.gob.mx/es/PoliticaMigratoria/Cuadros_PTAT?Anual=2022&Secc=1
- Vizcarra Bordi, I., Thomé Ortiz, H. y Hernández Linares, C. D. (2015). Miradas al futuro: El relevo generacional en el desarrollo de la conciencia social como estrategia de conservación de los maíces nativos. *Carta Económica Regional*, 115(20), 55-73. doi:10.32870/cer.v0i115.5668.

Importancia cultural y nutricional de especies de frijol (*Phaseolus*) endémicas de México

Kevin Matul-Ramos¹, David Fonseca Hernández¹, Lilia Carolina Acevez Mares¹, Elba Montserrat Alcázar Valle¹, Eugenia Lugo Cervantes¹ y Luis Mojica^{1*}

¹Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: lmojica@ciatej.mx

Palabras clave:

ayocote, comba, culinario, ibes, nutricional

Resumen

El frijol común es una de las legumbres más consumidas en México, así como uno de los alimentos base para la gastronomía mexicana. Se tuvo como objetivo recopilar información sobre tres especies del género *Phaseolus* (*P. coccineus* L., *P. lunatus* L. y *P. polyanthus* L.), las cuales, a pesar de no ser comúnmente conocidas, tienen un importante valor nutricional y cultural. Se describe la distribución, importancia culinaria y potencial biológico de las distintas especies, así como las zonas biogeográficas donde se cultiva cada una. De igual manera, se describe el contenido de proteína, carbohidratos, grasas, fibra y fitoquímicos como los compuestos fenólicos presentes en las variedades reportadas. Con ello se busca dar una breve introducción e incentivar al aprovechamiento de estas especies con gran potencial agrícola y alimentario.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la segunda legumbre más consumida en el mundo después de la soya (*Glycine max*), en México se considera uno de los cultivos más importantes del sector agrícola. En el año 2023 se sembró una superficie total de 597,133.13 ha de las cuales se obtuvo un rendimiento de 0.82 unidades de medidas por hectáreas (udm/ha), reportado por el Servicio de Información Agrícola y Pesquera (SIAP, 2023). Es un cultivo perenne que se encuentra en climas húmedos, tropicales y secos incluyendo también climas subhúmedos, subtropicales y subsecos (Vargas Vázquez *et al.*, 2012).

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2), 93-108.
ISSN: 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12774554>

Recibido: 14 marzo 2024
Revisado: 9 mayo 2024
Aceptado: 15 julio 2024
Publicado: 18 julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



La clasificación taxonómica del frijol pertenece al orden Fabales y a la familia Fabaceae en la cual existen cuatro especies importantes del género *Phaseolus* las cuales son: *P. vulgaris* L. (frijol común), *P. coccineus* L. (frijol Ayocote, Botil), *P. lunatus* L. (frijol Comba, andino) y *P. polyanthus* L. (Ibes, frijol de todo el año, Acalelt, Xuyumel) (Alcázar-Valle *et al.*, 2020).

La domesticación del frijol proviene de dos herencias genéticas (Mesoamérica y los Andes), aunque estas especies de frijol se han encontrado de forma silvestre y domesticada por todo el territorio mexicano con diferentes morfologías, colores y tamaños. Sus características dependen de la especie, la zona biogeográfica, altitud y clima (Andueza-Noh *et al.*, 2016). Estas condiciones proporcionan una gran diversidad en composición fitoquímica y nutricional a las semillas de frijol. Autores como Schier *et al.* (2019) mencionan que el tamaño de raíces que presenta cada especie juega un papel importante en la captación de minerales y nutrientes dependiendo el género, con impacto en la composición nutricional de cada especie de semilla (Suárez-Martínez *et al.*, 2016).

A pesar de que el frijol común es la especie más comercializada y consumida en México desde la época Prehispánica, esta presenta algunas desventajas como su cultivo anual, sensibilidad al estrés abiótico, volviéndola una especie que puede ser vulnerable durante cambios de clima adversos y a estrés biótico (plagas y enfermedades) (Schier *et al.*, 2019). Además, presenta una mayor composición de compuestos considerados como antinutricionales (inhibidores de tripsina, leptina, ácidos fítics, entre otros) que pueden afectar la adsorción de nutrientes al momento de consumirse (Bosmali *et al.*, 2023).

Por otro lado, especies como *P. coccineus* L., *P. lunatus* L. y *P. polyanthus* L. presentan una variedad genética que los hace resistentes a distintos climas, altitudes y condiciones ambientales, así como diversa composición de compuestos nutricionales (Porch *et al.*, 2013). Purwanti y Fauzi, (2019) han reportado que algunas especies del género *Phaseolus* presentan una menor cantidad de compuestos antinutricionales en comparación al frijol común. Sin embargo, la limitante que presentan estas especies de *Phaseolus* es la escasa información que existe acerca de los compuestos nutricionales, la distribución y el potencial biológico que pueden tener estas. Por ello, el presente trabajo se centra en recopilar información sobre tres especies del género *Phaseolus* con el fin de dar a conocer la importancia cultural y nutricional de estas especies cultivadas y poco reconocidas en México.

Distribución en México

El frijol se ha distribuido por todo el continente americano, siendo México donde se encuentra la mayor diversidad de especies. Las especies más relevantes son el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), Comba (*Phaseolus lunatus* L.), Ayocote (*Phaseolus*



coccineus L.) e Ibes (*Phaseolus polyanthus* L.), las cuáles se han identificado, clasificado por su morfología y pruebas filogenéticas (Vargas Vázquez, Lépiz & Pérez, 2012). Su cultivo y desarrollo depende del clima, la altitud, la zona biogeográfica y tipo de suelo. A continuación, se describirán las características generales de cada especie de frijol y las regiones donde se cultivan (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de variedades de frijol en México

Especie	Varietades	Zonas biogeográficas	Estados	Altitude máximas (msnm)	Referencia
Ayocote (<i>Phaseolus coccineus</i> L.)	31	Sierra Madre Oriental Eje Neovolcánico	Puebla	5600	(López-Baéz <i>et al.</i> , 2018)
	789	Eje Neovolcánico Sierra Madre Oriental Sierra Madre del Sur Mesa del Centro Sierras de Chiapas	Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México, Oaxaca, Querétaro, Michoacán, Guanajuato, Chiapas, Hidalgo, San Luis Potosí	800-2600	(Ruíz Salazar <i>et al.</i> , 2021)
Comba (<i>Phaseolus lunatus</i> L.)	104	Provincia de Tamaulipas Eje volcánico transversal Depresión del Balsas Sierra Madre del Sur Costa Pacífica Mexicana Provincia de Golfo de México Península de Yucatán Sierra de Chiapas	Tamaulipas, Veracruz, Jalisco, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Guerrero, Sinaloa, Nayarit, Colima, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas	500	(Andueza <i>et al.</i> , 2016)
Ibes (<i>Phaseolus polyanthus</i> L.)	30	Sierra Madre Occidental Sierra Madre del Sur	Jalisco	91,578	(Lopez Alcocer <i>et al.</i> , 2016)
	1	Sierra de Chiapas	Chiapas	1,000	(Acosta <i>et al.</i> , 1993)

Frijol Ayocote (*Phaseolus coccineus* L.)

El frijol Ayocote, también conocido como frijolón, bótíl (Chiapas), tecómare y patol (Chihuahua) o yegua (Jalisco), es un frijol endémico de Mesoamérica. En algunos trabajos de conservación se ha reportado la distribución de este frijol en regiones altas, en campos denominados “tierra templada” a 2,262 metros sobre el nivel del mar (msnm), donde los agricultores juegan un rol esencial en su distribución (Schmit and & Debouck , 1991;Porch et al, 2013). La altitud es un factor importante para el cultivo de distintas variedades de frijol Ayocote (Worthington *et al.*, 2012). Dentro de sus características generales, distintas variedades de frijol Ayocote presentan colores oscuros (violeta, morado, gris, café) con ligeros patrones moteados y rayados. Respecto a su morfología, la forma de riñón, rectangular, oval y redondeada predominan (Figura 1) (Vargas Vázquez *et al.*, 2012).



Figura 1. Frijol del género *Phaseolus*, frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), Ayocote (*Phaseolus coccineus* L.), Comba (*Phaseolus lunatus* L.) e lbes (*Phaseolus polyanthus* L.) de diferentes variedades las cuales fueron recolectadas en Chiapas y Guerrero

Fuente: elaboración propia

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) reportó la distribución de frijol Ayocote principalmente en los estados de Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México, Oaxaca, Querétaro, Michoacán, Guanajuato, Chiapas, Hidalgo y San Luis Potosí, presentando un rango de altitud que va de 801 a 2,602 msnm (Vargas-Vázquez *et al.*, 2012,). Por otra parte, se han reportado zonas biogeográficas relevantes donde se ha encontrado esta especie de frijol, las cuales se dividen en seis provincias correspondientes al Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental, Mesa del Centro y la Sierra de Chiapas, y algunas subprovincias donde se han recolectado como representadas son el Eje Neovolcánico (Lagos y volcanes del Anáhuac, y Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo), Sierra Madre Oriental (Carso Huasteco), Sierra Madre del Sur (Sierras Orientales y Mil Cumbres), Mesa del Centro (Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato) y Sierra de Chiapas y Guatemala (Sierras del Norte de Chiapas) (Vargas-Vázquez *et al.*, 2020, Ruíz-Salazar Hernandez, Vargaz & Mayek-Pérez, 2021).



Frijol Comba (*Phaseolus lunatus* L.)

El frijol Comba, también conocido como frijol ancho (Veracruz), lima o patachete (Jalisco), presenta una forma plana, ovalada, con patrones moteados (no en todas las semillas) de diferentes colores (rojo, blanco y negro) (Figura 1). Se han reportado en 16 estados de la república y en ocho provincias biogeográficas como la provincia Tamaulipas y el extremo norte de Veracruz, el eje volcánico transversal en la región que abarca los estados de Jalisco, Michoacán, Veracruz y Oaxaca, también en la provincia de la depresión del Balsas en los estados de Guerrero, Jalisco Michoacán, Morelos y Oaxaca, la provincia Sierra Madre del sur, la provincia Costa Pacífica Mexicana, en la provincia Golfo de México, la provincia Península de Yucatán y la provincia de Chiapas en las cercanías de la Sierra Madre de Chiapas (Pliego-Marín *et al.*, 2013; Andueza-Noh *et al.*, 2016). Además, se han encontrado en regiones con climas cálidos subhúmedo con lluvias en verano y en un rango de altitud de 400 hasta 2,292 msnm (Andueza-Noh *et al.*, 2016). Sin embargo, en algunos trabajos mencionan que *P. lunatus* L. se desarrolla mejor en altitudes bajas, con mayor precipitación al año, a diferencia de *P. coccineus* L. que se puede encontrar en climas y altitudes más variadas (López Soto *et al.*, 2005).

Frijol Ibes (*Phaseolus polyanthus* L.)

El frijol Ibes conocido por otros nombres como Xuyumel (Puebla, Totonaco), Acatel (Puebla, Nahual), es un frijol endémico de México conocido también como frijol de todo el año. Se ha encontrado de manera silvestre y en cultivo doméstico existiendo muy pocos registros de esta especie, pero ahora se sabe que esta especie tiene afinidad y relación genética con el frijol común (Porch *et al.*, 2013). Se ha encontrado su distribución desde Chihuahua hasta Xalapa. En este sentido, se reportó que en los Altos de Chiapas esta especie ha tenido menor incidencia a presentar enfermedades fúngicas que suelen afectar generalmente al frijol común (Acosta *et al.*, 1993). Esta especie se ha encontrado en lugares con mucha precipitación y alta humedad de los Altos de Chiapas en altitudes de 1,880 msnm (Schmit & Debouck, 1991).

Importancia culinaria y cultural

El frijol es uno de los alimentos e ingredientes base en la gastronomía mexicana, puesto que es la clave para la preparación de múltiples platillos típicos y sus variantes a lo largo del territorio nacional (Figura 2). La especie de frijol común es la más utilizada para la elaboración de platillos; sin embargo, otras especies como el frijol Comba y Ayocote son igualmente aprovechadas en las regiones donde se cultivan para preparar platillos tradicionales.



Figura 2. Mapa de platillos típicos referentes a las variedades de frijol
Fuente: elaboración propia

El frijol Ayocote es consumido por parte de la población que habita en regiones altas, el cual es cultivado principalmente por adultos mayores. Las técnicas de su cultivo tradicional han pasado de generación en generación, proporcionando un valor tanto cultural como económico a las variedades de Ayocote (López Báez, 2018). Debido a su gran tamaño, se utiliza para la preparación de diversos platillos, por ejemplo, en Tlaxcala se usa para preparar tlacoyos, en Puebla se añaden en adobos y cocidos, en el caso de Chiapas, consumen la flor del Ayocote en caldillos de jitomate con chile (Carmo, 2023). Por otro lado, en Querétaro se les conocen como “Ayecotes”, son cocinados con carne de cerdo y en preparaciones dulces. Además, en el Estado de México, Hidalgo, Puebla y Morelos los frijoles Ayocotes son preparados en mole con una variedad denominada “Elamajetl”, la cual es utilizada para preparar tamales en Veracruz (Muñoz, 2012). Por otra parte, el frijol Comba es consumido ampliamente en Chiapas y en la zona de Tierra Caliente, la cual está conformada por los estados de Michoacán, Guerrero y Estado de México. En esta zona se preparan cocidos junto con calabaza y queso asadero (Muñoz, 2012). En



Chiapas, el frijol Ibes (*P. polyanthus* L.) se utiliza para preparar tamales de toro pinto (tamal de frijol), cocido en caldo junto con otros ingredientes como epazote y chile para eventos y ocasiones especiales (Molina López, 2014).

Como se menciona anteriormente, el frijol es un ingrediente muy importante para la gastronomía mexicana, esto se debe a que el frijol forma parte del sistema agrícola tradicional conocido como "Milpa" que se ha utilizado desde la época prehispánica hasta la actualidad. Este se define como un sistema de policultivo donde varios cultivos comparten el mismo espacio para su crecimiento y desarrollo. El maíz (*Zea mays*) es la principal especie del sistema milpa, el cual generalmente se acompaña de calabaza (*Curcubita* spp.) y distintas especies y variedades de frijol; sin embargo, se pueden cultivar otras especies como el chile y tomate, esto le ha dado una importancia cultural en nuestra gastronomía. (Sánchez-Velázquez *et al.*, 2023). A esta combinación se le conoce como "la tríada mesoamericana". En México y en las tribus de América del Norte esta práctica de cultivo se ha conservado a través de la leyenda "las tres hermanas" (Yu Liu, 2019). Biruete *et al.* (2024) mencionaron que se ha utilizado otras legumbres provenientes del género *Phaseolus* como *P. lunatus* L., lo que ha contribuido a la gran diversidad en ingredientes y alimentos que entran en el patrón dietético.

Las distintas variedades de frijol son parte de las tradiciones culinarias de México, por ello es importante preservar y resaltar el valor de estas para evitar su pérdida como ingrediente típico en la creación de distintos platillos, así como incentivar a la preservación de su cultivo y uso en las distintas regiones a través del país.

Características Nutricionales

Carbohidratos

Los carbohidratos son el principal macronutriente que se encuentra en el frijol. En la Tabla 2 se presenta el porcentaje de carbohidratos (60 a 73%) respectivo a las especies del género *Phaseolus*. Estos macronutrientes son utilizados por la planta como reserva energética, para ser aprovechados durante el proceso de germinación y crecimiento hasta que esta alcanza un desarrollo adecuado. La presencia de estos distintos tipos de carbohidratos se debe a varios factores como: el suelo, capacidad de adsorción de la raíz para fijar nitrógeno, las precipitaciones, la altitud y las regiones biogeográficas en la que se encuentra. Los principales carbohidratos que se encuentran en el cotiledón son: almidón, sacarosa, glucosa y fructosa (Vargas-Vázquez *et al.*, 2020). Existe una gran variedad de estudios de frijol Ayocote donde se destaca el alto contenido de carbohidratos (Alcázar-Valle *et al.*, 2020, 2021; Alvarado-López *et al.*, 2019; Corzo-Ríos *et al.*, 2020; Imam *et al.*, 2024). Alvarado-López *et al.* (2019) reportaron el contenido nutricional de cuatro variedades de frijol Ayocote



encontrando diferencias significativas, donde destacaron el frijol Ayocote variedad negro (60.9%) y variedad blanca (67.7%). Por otra parte, en un estudio de distintas variedades de frijol de Chiapas, la única variedad de *P. polyanthus* L. presentó una abundancia de carbohidratos (>60%) en comparación con las demás especies reportadas (Alcázar-Valle *et al.* 2021).

Tabla 2. Nutrientes (proteína, carbohidratos, fibra, grasa y cenizas) y compuesto fitoquímicos encontrados en frijoles del género *Phaseolus* spp

Especies de <i>Phaseolus</i>	Proteína (%)	Carbohidratos (%)	Fibra (%)	Grasa (%)	Ceniza (%)	Fitoquímicos	Referencias
<i>P. lunatus</i> L.	25.5	N/R	5.9	0.75	4.9	N/R	(Betancur-Ancona <i>et al.</i> , 2004)
	25	N/R	>4.5	>1	N/R	N/R	(Pliego-Marín <i>et al.</i> , 2013)
	>21	>60	<6	<6	<6	<3 µgEAF/g harina 250 µgEQ/g harina	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)
<i>P. coccineus</i> L.	20	>60	<6	<6	<6	>50 µgEG/g harina >150 µgEQ/g harina	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)
	18.9	67.09	6.72	1.61	4	1,732.34 mg EAG/Kg 1,501.30 mg QE/Kg 1,082.27 mg EC3G/Kg	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	18.5	67.7	6.7	1.6	4.1	2075.91 mg EAG/Kg 1612.30 mg EQ/Kg 1193.27 mg EC3G/Kg	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	18.1	67.8	6.9	1.6	4.2	1561.25 mg EAG/Kg 1248.75 mg EQ/Kg 278.92 mg EC3G/Kg	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	18.2	67.7	6.5	1.6	4.1	1292.24 mg GAE/Kg 1084.51 mg EQ/Kg 2.21 mg EC3G/Kg	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	18.0	N/R	21.8	2.8	18.6	8.7 mg EAG/Kg 11.74 mg EC/Kg	(Corzo-Ríos <i>et al.</i> , 2020)
	17.7	N/R	17.8	3.6	17.8	8.07 mg EAG/Kg 12.02 mg EC/Kg	(Corzo-Ríos <i>et al.</i> , 2020)
	18.82	73.93	0.07	2.78	4.45	59.3 mg EAG/100 g 3.6 mg EC3G/100 g 64.65 mg CA/100 g	(Osuna-Gallardo <i>et al.</i> , 2023)
<i>P. polyanthu</i> L.	20	>60	<6	<6	<6	>50 µg/g base seca 662.0 mg EAG/g base seca	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)
<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	20.78	62.57	5.02	2.22	3.78	440.40 mg EAG/g 8.82 mg EQ/g 2.69 mg EC3G/g 1.37 mg EC/g	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2021)

Abreviatura. N/R= no reportado, Equivalentes de ácido gálico (EGA). Equivalente de catequina (EC), Equivalentes de cianidina-3-glucosido (EC3G), Equivalentes de quercetina (EQ).



Fibra

La fibra se encuentra en la pared celular de las células vegetales, las cuales se asocian en estructuras fibrosas, así mismo se presenta una gran variedad de polisacáridos en forma lineal o ramificados de glucosa u otros glúcidos (Osuna-Gallardo *et al.*, 2023). La fibra se define como una sustancia orgánica no nitrogenada que no se disuelve tras procesos de hidrólisis o digestión sucesiva en medios ácidos y alcalinos (García Ochoa *et al.* 2008). Alimentos con alto contenido de fibra, como algunas especies de frijol, pueden tener efectos benéficos en la salud ya que la fibra puede ser utilizada por la microbiota intestinal como prebiótico (Birute *et al.*, 2024; Ebel *et al.*, 2017). Respecto a la fibra reportada en variedades de frijol Ayocote, Alvarado-López *et al.* (2019) reportaron que obtuvieron rangos de 6.50 a 6.90% en fibra. Por otra parte, Osuna-Gallardo *et al.* (2023) reportaron la presencia de 30.38% de fibra en la harina de frijol Ayocote, 35.49% en la harina de Ayocote cocida y 29.85% en harina de Ayocote extruida, en la cual obtuvieron un aumento del 3.59% en la fibra soluble con el tratamiento de extrusión. Esto lo atribuyen a tener formación de almidón resistente o complejos taninos-proteína que contribuye a la formación de fibra. Alcázar-Valle *et al.* (2020) reportaron mayor porcentaje de fibra (>6%) en frijol Ayocote en comparación del frijol Comba y el frijol Ibes (>4%).

Proteína

El frijol destaca por su alto contenido de proteína, estas especies de frijol (Ayocote, Comba e Ibes) presentan un rango de porcentaje de proteína que va de 17.7 a 25.5% (Tabla 2) La especie que se reporta con mayor porcentaje de proteína es el frijol Comba en comparación al frijol Ayocote e Ibes. Particularmente Betancur-Ancona *et al.* (2004) han trabajado en el aprovechamiento del frijol Comba (*P. lunatus*) al desarrollar un proceso tecnológico en el cual se extrajeron fracciones proteicas y de almidón mediante un proceso de molienda húmeda.

La proteína de la harina de frijol Comba contiene mayor porcentaje de lisina (0.15 g/kg) (Tabla 3). La concentración de aminoácidos azufrados como metionina y cisteína tiene similitud con algunas alubias de Brasil. Pliego-Marín *et al.* (2013) reportaron rangos de proteína de 18.4-28.6% tanto en variedades de frijol común y frijol Comba, los re discuten que la información encontrada en sus resultados puede tener relación el valor nutricional del frijol común y el frijol Comba, destacando que *P. lunatus* L. puede ser una alternativa con alto valor nutricional para la dieta en poblaciones donde se distribuyen naturalmente. Alcázar-Valle *et al.* (2020) mencionan que el frijol Ibes mostró mayor concentración en los aminoácidos histidina (24.08 mg/100g), isoleucina (8.70 mg/100g), leucina (20.01 mg/100g) y fenilalanina (12.08 mg/100g) en comparación las otras especies estudiadas (Tabla 3).



Tabla 3. Contenido de aminoácido reportados en diferentes especies del género *Phaseolus*

Especie	Histidina (g/Kg)	Lisina (g/Kg)	Triptófano (g/Kg)	Fenilalanina (g/Kg)	Metionina (g/Kg)	Treonina (g/Kg)	Isoleucina (g/Kg)	Leucina (g/Kg)	Valina (g/Kg)	Autor
<i>P. lunatus</i> L.	N/R	79.7	13.2	59.0	7.5	49.0	N/R	42.9	51	(Betancur-Ancona <i>et al.</i> , 2004)
	14.03*	14.33*	12.77*	9.14*	2.35*	15.36*	5.27*	19.09*	14.84*	(Alcázar-Vallé <i>et al.</i> , 2020)
<i>P. coccineus</i> L.	10.66*	14.33*	14.13*	9.14*	1.75*	15.32*	4.51*	12.72*	15.18*	(Alcázar-Vallé <i>et al.</i> , 2020)
	N/R	15.03	N/R	N/R	3.06	9.54	10.36	18.32	0.014	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	N/R	14.62	N/R	N/R	2.92	9.14	10.11.	17.75	13.18	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	N/R	14.15	N/R	N/R	2.74	8.90	9.96	17.44	13.18	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
	N/R	14.06	N/R	N/R	10.41	9.33	10.41	18.44	13.77	(Alvarado-López <i>et al.</i> , 2019)
<i>P. polyanthus</i> L.	24.08*	14.84*	15.14*	12.08*	2.56*	28.22*	8.7*	20.01*	27.20*	(Alcázar-Vallé <i>et al.</i> , 2020)

Abreviaturas N/P= no reportado * unidades utilizadas en este artículo de mg/100g.

Grasas

El frijol presenta un bajo porcentaje de grasa, se han reportado valores de 1 a 6% en estas especies de *Phaseolus*. (Tabla 2). En frijol Ayocote, Osuna-Gallardo *et al.* (2023) caracterizaron los ácidos grasos presentes (2.78%) de frijol Ayocote, encontrando la presencia de ácido palmítico (13.71%), ácido estérico (2.38%), ácido oleico (15.16%), ácido linoleico (38.12%) y ácido linolénico (21.64%). Algunos de ellos, como el ácido linoleico y el linolénico, se ven afectados durante el proceso de cocción, debido a que se ha reportado un aumento en su concentración después de cocinar a 100 °C durante 2 h.

Fitoquímicos

Los fenoles son metabolitos secundarios que se encuentran en la mayoría de las plantas, están formados por un anillo benzoico unido a un grupo hidroxilo dentro de su estructura (Parr & Bolwell, 2000). El grupo hidroxilo juega un papel importante en la donación de protones (H⁺), ayuda a quelar iones metálicos entre otros procesos importantes que les confieren propiedades biológicas a estos compuestos (Parr & Bolwell, 2000). Los compuestos fenólicos reportados en frijol común (negro) son quercetina-3-D-galactósido, cianidina-3-glucósido, ácido gálico, ácido cafeico,



daidzeína, ácido sinápico, naringenina, ácido rosmarínico, catequina, miricetina y ácido ferúlico (Fonseca-Hernández *et al.*, 2021).

Los fenoles reportados en frijol Ayocote, Comba e Ibes están en un rango de 8.07-2,075.91 mg equivalentes de ácido gálico o EAG/kg (Tabla 2). Alvarado-López *et al.* (2019) reportaron compuestos fenólicos presentes en frijol Ayocote en variedades rojas (2,075 mg EAG/kg) negro (1,732.34 mg EAG/kg) café (1,561.25 mg EAG/kg) y blanco (1,292.24 mg EAG/kg), estos datos tienen correlación con los compuestos fenólicos responsables de dar el color en la semilla del frijol como las antocianinas, además de que los autores indican que estas concentraciones son atribuidas a diferentes factores, tales como el genotipo, variedad, especie, las prácticas agronómicas, la madurez de la cosecha, entre otros. El estudio de Corzo-Ríos *et al.* (2020) tuvo como objetivo analizar nueve variedades de frijol común (*P. vulgaris* L.) y Comba (*P. coccineus* L.) para conocer los efectos del tratamiento térmico en su composición química, destacando al frijol comba con el mayor contenido de fenoles totales (8.7 mg EAG/kg) y taninos condensados (11.74 mg equivalentes de catequina o EC/kg) en comparación al frijol común. El frijol Ibes (*P. polyanthus* L.) presenta valores altos en fenoles totales (662.0 mg EAG/g) en comparación con otras especies (Alcázar-Valle *et al.*, 2020).

Las antocianinas son metabolitos secundarios que se caracterizan por tener un grupo benceno unido a un azúcar, estos compuestos les confieren características morfológicas como el color y propiedades sensoriales al frijol (Parr & Bolwell, 2000). Alvarado-López *et al.* (2019) reportaron que el contenido de antocianinas y flavonoides totales que obtuvieron con la variedad negro (1,082.27 mg equivalentes de cianidina-3-glucosido o reportado como EC3G/kg y 1,501.30 mg equivalentes de quercetina o EQ/kg), respectivamente y púrpura (1,193.27 mg EC3G/kg y 1,612.30 mg EQ/kg), y que presentó menor contenido fue la blanca (2.21 mg EC3G/kg y 1,084.51 mg EQ/kg), (Tabla 2).

Potencial biológico

Existe muy poca información sobre el potencial biológico de frijol del género *Phaseolus*. Se han utilizado pruebas bioquímicas para conocer el potencial antioxidante del frijol Ayocote, incluyendo ensayos del poder antioxidante reductor del hierro (FRAP) (60.2%) y en ensayos de 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) (62.9% de inhibición del radical DPPH). En contraste al frijol común (27 % FRAP), el potencial antioxidante del frijol Ayocote podría estar relacionado con su contenido de antocianinas (Aquino-Bolaños *et al.*, 2021) (Tabla 4). Por otra parte, el potencial antioxidante de harina de frijol Ayocote se mantuvo después de ser sometido a un proceso de cocción reportando 80.5% de retención (Capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) y 87.35% de retención (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS) (Osuna-Gallardo *et al.*, 2023).



Tabla 4. Potencial biológico que se ha reportado en el género de *Phaseolus*

Especie	Potencial biológico	Ensayo (unidades representadas por cada autor)	Efecto	Autores
<i>P. coccineus</i> L.	Antioxidante	DPPH (62.9%) y FRAC (60.2%)	Se encuentra mayor potencial antioxidante en frijol Ayocote	(Aquino-Bolaños <i>et al.</i> , 2021)
	Antioxidante	ABTS (80.57%) y DPPH (56.47%)	El frijol Ayocote tiene un potencial antioxidante	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2021)
	Antioxidante	ABTS (60%) y DPPH (>80%)	El frijol Ayocote puede tener igual o mayor potencial antioxidante comparación del frijol común.	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)
	Antioxidante	Harina ORAC (3,866.37 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$) y ABTS (2,657.94 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$) Cocción ORAC (88.50% de retención) Y ABTS (87.35% de retención) Extrusión ORAC (2,879.72 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$) Y ABTS (2,062.09 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$)	El frijol Ayocote mostró un alto porcentaje de retención en la actividad antioxidante en los dos procesos.	(Osuna-Gallardo <i>et al.</i> , 2023)
<i>P. lunatus</i> L.	Antioxidante	ABTS (84.18%) Y DPPH (88.0%)	El potencial antioxidante tiene correlación con el color de la semilla negra como <i>P. lunatus</i> L.	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2021)
	Antioxidante	ABTS (>80%) y DPPH (80%)	El frijol Comba puede tener el mismo o mayor que el frijol común	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)
	Inhibición a ECA	IC50 3.8 mg/mL	Péptidos del frijol Comba tiene potencial para inhibir a ECA	(Ruiz Ruiz <i>et al.</i> , 2013)
<i>P. polyanthus</i> L.	Antioxidante	ABTS (>60%) y DPPH (>80%)	Frijol lbes tiene el mismo o mayor potencial antioxidante que <i>P. vulgaris</i> L.	(Alcázar-Valle <i>et al.</i> , 2020)

Concentración inhibitoria al 50% (IC50). Inhibición de radical libre ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)). Inhibición de radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Capacidad de absorbanca de radicales de oxígeno (ORAC). ET equivalentes de Trolox.

Se ha reportado el potencial antioxidante de la harina en frijol Comba y frijol Ayocote, con un porcentaje de inhibición de DPPH de 88.08% y 56.47%, respectivamente en variedades de Chiapas, Oaxaca y Guerrero. Cabe mencionar que el potencial antioxidante esta correlacionado con el contenido de antocianinas y taninos que proporcionan el color negro a estas variedades de frijol (Alcázar-Valle *et al.*, 2020).

Por otra parte, se ha evaluado la capacidad para inhibir la enzima convertidora de angiotensina (ECA), un importante blanco molecular en el tratamiento de la hipertensión, utilizando proteína de *P. lunatus* L. sometida a diferentes tratamientos de digestión y encapsulación. La mayor inhibición de la actividad de ECA fue de 3.8 mg/mL (IC50) (Ruiz Ruiz *et al.*, 2013).

Conclusiones

Las especies del género *Phaseolus* crecen en altitudes que van desde 91 a los 5,600 msnm, en diferentes zonas biogeográficas con diferentes tipos de climas (secos, tropicales y húmedos). Estos factores ayudan a tener una mayor biodiversidad de tipos de variedades nativas de frijol de cada una de las especies del género *Phaseolus*.



Esta diversidad permite tener una mayor proporción de compuestos nutricionales y fitoquímicos que confieren potencial biológico. Dichas características podrían ser utilizadas como estrategia de revalorización al frijol Ayocote, Comba e Ibes. A pesar de su bajo consumo, existe una gran diversidad de platillos en México que incluyen estas semillas, dando fe de su importancia cultural y gastronómica. Es necesario realizar investigación sobre los compuestos nutricionales y el potencial biológico de estas variedades de frijol, especialmente del frijol Ibes.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimientos

El autor de este proyecto fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) a través de la beca no. 11716 y el Proyecto FORDECYT No. 292474-2017.

Referencias

- Acosta J. A., Maruaga Martínez, J. S., & Khairallah M.M. (1993). Informe de Colecta México 1993. *Informe Del INIFAP, 1*, 1-13 pp. Recuperado de <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/094a28eb-a>
- Alcázar-Valle, M., García-Morales, S., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Sánchez-Osorio, E., Flores-López, L., Enríquez-Vara, J. N., & Lugo-Cervantes, E. (2021). Nutritional, antinutritional compounds and nutraceutical significance of native bean species (*Phaseolus* spp.) of mexican cultivars. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(11). <https://doi.org/10.3390/agriculture11111031>
- Alcázar-Valle, M., Lugo-Cervantes, E., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Reyes-Ramírez, H., Enríquez-Vara, J. N., & García-Morales, S. (2020). Bioactive compounds, antioxidant activity, and antinutritional content of legumes: A comparison between four *Phaseolus* species. *Molecules*, *25*(15). <https://doi.org/10.3390/molecules25153528>
- Alvarado-López, A. N., Gómez-Oliván, L. M., Heredia, J. B., Baeza-Jiménez, R., García-Galindo, H. S., & López-Martínez, L. X. (2019). Nutritional and bioactive characteristics of Ayocote bean (*Phaseolus coccineus* L.): An underutilized legume harvested in Mexico. *CYTA - Journal of Food*, *17*(1), 199–206. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1571530>
- Andueza-Noh, R. H., Camacho-Pérez, L., Martínez-Castillo, J., & May-Pat, F. (2016). Distribución Geográfica de los Parientes Silvestres del Acervo Genético Mesoamericano del Frijol Lima (*Phaseolus lunatus* L.) en México. *Polibotánica*, *0*(41). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.41.7>



- Aquino-Bolaños, E. N., Garzón-García, A. K., Alba-Jiménez, J. E., Chávez-Servia, J. L., Vera-Guzmán, A. M., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Santos-Basurto, M. A. (2021). Physicochemical characterization and functional potential of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus coccineus* L. landrace green beans. *Agronomy*, 11(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040803>
- Betancur-Ancona, D., Gallegos-Tintoré, S., & Chel-Guerrero, L. (2004). Wet-fractionation of *Phaseolus lunatus* seeds: Partial characterization of starch and protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(10), 1193–1201. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1804>
- Biruete, A., Leal-Escobar, G., Espinosa-Cuevas, Á., Mojica, L., & Kistler, B. M. (2024). Dieta de la Milpa: A Culturally-Concordant Plant-Based Dietary Pattern for Hispanic/Latine People with Chronic Kidney Disease. *Nutrients*, 16(5), 574. <https://doi.org/10.3390/nu16050574>
- Bosmali, I., Giannenas, I., Christophoridou, S., Ganos, C. G., Papadopoulos, A., Papathanasiou, F., Kolonas, A., & Gortzi, O. (2023). Microclimate and Genotype Impact on Nutritional and Antinutritional Quality of Locally Adapted Landraces of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Foods*, 12(1119), 1–19. <https://doi.org/10.3390/foods12061119>
- Carmo M. (2023, January 26). Frijol Ayocote, la leguminosa mexicana que podría desaparecer pronto. *Gastronomía y Cultura*. <https://gourmetdemexico.com.mx/gourmet/cultura/frijol-ayocote-leguminosa-mexicana-podria-desaparecer/>
- Corzo-Ríos, L. J., Sánchez-Chino, X. M., Cardador-Martínez, A., Martínez-Herrera, J., & Jiménez-Martínez, C. (2020). Effect of cooking on nutritional and non-nutritional compounds in two species of *Phaseolus* (*P. vulgaris* and *P. coccineus*) cultivated in Mexico. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 20, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100206>
- Ebel, R., Pozas Cárdenas, J. G., Soria Miranda, F., Cruz González, J., Pozas Cárdenas, J. G., & Miranda Cruz S., G. F. J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. Organic milpa: yields of maize, beans, and squash in mono- and polycropping systems. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 149–160. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000200149&lng=es&tlng=es
- Fonseca-Hernández, D., Lugo-Cervantes, E. D. C., Escobedo-Reyes, A., & Mojica, L. (2021). Black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) polyphenolic extract exerts antioxidant and antiaging potential. *Molecules*, 26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216716>
- García Ochoa, O. E., Infante, R. B., & Rivera, C. J. (2008). Hacia una definición de fibra alimentaria. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 21(1), 25–30. <http://ve.scielo>



- org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-07522008000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- López Báez, L. I. (2018). *El cultivo de frijol Ayocote en el Centro -Oriente de Puebla: diversidad, manejo y características de las unidades de producción* [tesis de maestría, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas].
- López Soto, J. L., Ruiz Corral, J. A., Sánchez González, J. J. , & Lépiz Ildefonso, R. (2005). Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestres (*Phaseolus* spp.) en la república mexicana. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3), 221–230. <http://dx.doi.org/10.35196/rfm.2005.3.221>
- Molina, M. (2014). Cocina prehispánica. En Secretaría de Cultura, *Chiapas, viaje culinario*(pp. 38-53). Pinacoteca Editores
- Muñoz, Z. R. (2012). Ayocote. *Diccionario Enciclopédico de La Gastronomía Mexicana Volumen 1*. Larousse. <https://laroussecocina.mx/palabra/ayocote/>
- Osuna-Gallardo, E. I., Cuevas-Rodríguez, E. O., Sepúlveda-García, C. I., Reyes-Moreno, C., León-López, L., Han, R., & Hernández-Álvarez, A. J. (2023). Impact of Cooking and Extrusion Processing on Nutritional, Antinutritional, and Techno-Functional Characteristics of Indigenous Bean (*Phaseolus coccineus*). *ACS Food Science and Technology*, 3(11), 1835–1853. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00416>
- Parr, A. J., & Bolwell, G. P. (2000). Phenols in the plant and in man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(7), 985–1012. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000515\)80:7<985::AID-JSFA572>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7<985::AID-JSFA572>3.0.CO;2-7)
- Pliego-Marín, L., López-Baltazar, J., & Aragón-Robles, E. (2013). Características físicas, nutricionales y capacidad germinativa de frijol criollo bajo estrés hídrico* Physical, nutritional and germination characteristics of native beans under water stress. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* , 6, 1197–1209. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1283>
- Porch, T. G., Beaver, J. S., Debouck, D. G., Jackson, S. A., Kelly, J. D., & Dempewolf, H. (2013). Use of wild relatives and closely related species to adapt common bean to climate change. *Agronomy*, 3(2), 433–461. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020433>
- Purwanti, E., & Fauzi, A. (2019). The Morphological Characteristics of *Phaseolus lunatus* L. in Different Areas of East Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental. Science*, 276(1), 1–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/276/1/012017>
- Ruiz Ruiz, J. , C., Segura Campos, M. , R., Betancur Ancona, D. A., & Chal Guerrero, L. A. (2013). Encapsulation of *Phaseolus lunatus* protein hydrolysate with



- angiotensin-converting enzyme inhibitory activity. *ISRN Biotechnology*, 2013, 6. <https://doi.org/10.5402/2013/341974>
- Ruíz-Salazar, R., Hernández-Delgado, M., Vargaz Vázquez, M. & Mayek-Pérez, N. (2021). Estado actual de los recursos genéticos de *Phaseolus coccineus* (Fabaceae) en México. *Boletín De La Sociedad Argentina De Botánica*, 56(3). <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v56.n3.32297>
- Sánchez-Velázquez, O. A., Luna-Vital, D. A., Morales-Hernandez, N., Contreras, J., Villaseñor-Tapia, E. C., Fragoso-Medina, J. A., & Mojica, L. (2023). Nutritional, bioactive components and health properties of the milpa triad system seeds (corn, common bean and pumpkin). *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1169675>
- Schier, H. E., Eliot, K. A., Herron, S. A., Landfried, L. K., Migicovsky, Z., Rubin, M. J., & Miller, A. J. (2019). Comparative analysis of perennial and annual *Phaseolus* seed nutrient concentrations. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su11102787>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023, January 31). *Avances de siembra y cosecha. Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Suárez-Martínez, S. E., Ferriz-Martínez, R. A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J. E., De La Torre Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: Leading nutraceutical source for human health. *CYTA - Journal of Food*, 14(1), 131–137. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1063548>
- Vargas Vázquez, M. L. P., Muruaga Martínez, J. S., Lépiz Ildefonso, R., & Pérez Guerrero, A. (2012). La colección INIFAP de frijol ayocote (*Phaseolus coccineus* L.) I: Distribución geográfica de sitios de colecta. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1247-1259. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000600014&lng=es&tlng=es
- Vargas-Vázquez, M. L. P., Uscanga-Mortera, E., Padilla-Chacón, D., Vibrans, H., Kohashi-Shibata, J., Miranda-Colín, S., & Yáñez-Jiménez, P. (2020). Biomass and carbohydrate partitioning in seeds and seedlings of domesticated and wild *Phaseolus coccineus* L. *Botanical Sciences*, 98(2), 366–376. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2485>
- Worthington, M., Soleri, D., Aragón-Cuevas, F., & Gepts, P. (2012). Genetic composition and spatial distribution of Farmer-managed *Phaseolus* Bean Plantings: An example from a village in Oaxaca, Mexico. *Crop Science*, 52(4), 1721–1735. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0518>

BIOINSUMOS

PARA UNA AGRICULTURA SUSTENTABLE





Los hongos entomopatógenos endémicos de México y su uso en el control microbiano de plagas

Roberto Montesinos-Matías^{1*}, Marco A. Mellin-Rosas¹ y Jorge A. Sánchez-González¹

¹Departamento de Control Biológico, Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria, DGSV-SENASICA, Km 1.5 Carretera Tecomán-Estación FFCC, Col. Tepeyac, C.P. 28110, Tecomán, Colima, México

*Autor de correspondencia: montesinosroberto@yahoo.com.mx

Resumen

Palabras clave:

cultivo, micoinsecticida, plaga, sustentabilidad

La seguridad agroalimentaria a nivel mundial es amenazada cada año por la aparición de plagas. De las 1 272 plagas reconocidas a nivel global, cerca de 250 están presentes en México y afectan los rendimientos entre el 20 y el 40%. El control químico sigue siendo la principal herramienta de control; sin embargo, en los últimos años, se ha venido promoviendo el uso de hongos entomopatógenos en México, a través de programas implementados por el SENASICA. El desarrollo de esta tecnología es a través del Centro Nacional de Referencia de Control Biológico (CNRF-DGSV-SENASICA), que prioriza el uso de organismos locales, considerando su ventaja adaptativa a las condiciones ambientales de cada región. Se describen las fases de desarrollo del control microbiano para hacer posible su uso y atender plagas de importancia nacional como la langosta, psílido asiático de los cítricos y el pulgón café de los cítricos. El uso de hongos entomopatógenos endémicos ofrece varios beneficios para la sanidad vegetal, es específico para la plaga y no afecta a la fauna benéfica, además no genera resistencia, y es seguro para el ser humano, debido a que son considerados de bajo riesgo.

Introducción

En la actualidad la población mundial experimenta un crecimiento exponencial y se proyecta que para el 2050 se acercará a los 10 000 millones de personas. El crecimiento demográfico representa un desafío para la producción agrícola de alimentos, de acuerdo con los principios de sostenibilidad agrícola. Según la FAO, entre el 20

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
111-124. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12765085>

Recibido: 14 marzo 2024
Revisado: 28 de mayo 2024
Aceptado: 04 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



y 40% de la producción agrícola mundial se pierde anualmente debido a las plagas (1 272 plagas reconocidas) (FAO 2019), por lo que el control de plagas surge como una preocupación primordial en la producción de cultivos. El uso de plaguicidas sintéticos ha experimentado un aumento significativo y alarmante en las últimas décadas, convirtiéndose en un elemento central del sistema de producción de cultivos predominantes. A pesar de su efectividad, varios de estos plaguicidas sintéticos están relacionados con una gran cantidad de consecuencias adversas tanto para la salud humana como para el ambiente. Por otra parte, muchos países han integrado en sus políticas públicas la reducción del uso de plaguicidas como un objetivo principal para promover una agricultura sostenible (García-Espinoza, Yousef-Yousef, García del Rosal, Cuenca-Medina, & Quesada-Moraga, 2024).

La asamblea de la ONU declaró en el año 2020 como año internacional de la sanidad vegetal para promover la salud de las plantas, puesto que cada vez están más amenazadas. El cambio climático y las actividades humanas han deteriorado los ecosistemas, reducido la biodiversidad y creado nuevos nichos donde las plagas pueden prosperar (Figura 1).

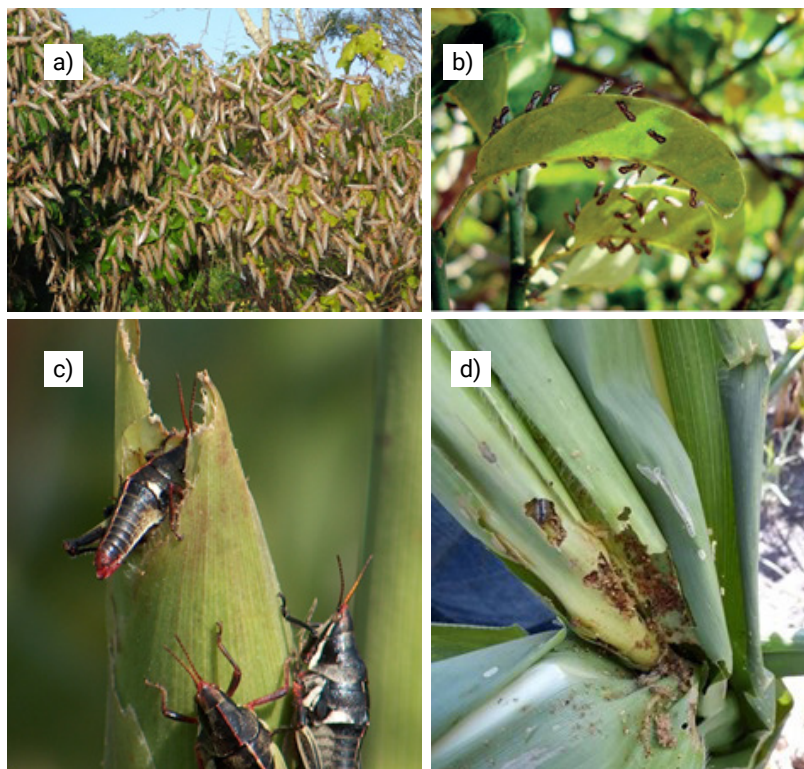


Figura 1. Tipos de plagas insectiles presentes en México. a) langosta, b) psílido asiático de los cítricos, c) chapulines y d) el gusano cogollero (créditos CESAVEG y CESVY)

El uso de hongos entomopatógenos (HEP) es una alternativa al ser respetuosos con el medio ambiente, tienen el potencial de establecer un ecosistema estable y libre de plagas, fomentando la productividad de los cultivos de manera sostenible. Los



HEP son reconocidos como una herramienta de control biológico para ser utilizados en los programas de manejo integrado de plagas (MIP) un conjunto de estrategias sustentables para el manejo de plagas donde se integran herramientas biológicas, culturales, físicas y químicas para minimizar los riesgos económicos, ambientales y de salud humana (Rodríguez del Bosque, 2020), ya que pueden infectar a varios artrópodos con un modo de acción único por contacto a través del tegumento, desempeñando un papel clave en el control (Quesada-Moraga, Yousef-Naef & Garrido-Jurado, 2020). Entre los HEP, los géneros *Beauveria*, *Isaria* y *Metarhizium* se consideran excelentes ejemplos y son los más utilizados a nivel mundial (Arcas, 2019).

México es un país mega diverso, con varias condiciones edafológicas y climas en sus diferentes regiones, lo que hace un potencial enorme para obtener varios aislamientos de HEP, con grados diferentes de adaptación, y es un recurso muy valioso para el desarrollo de programas de control microbiano de las plagas agrícolas.

En México, el Centro Nacional de Referencia de Control Biológico (CNRCB) (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2024) ha desarrollado programas de CB para mitigar varias plagas de importancia fitosanitaria. Las fases para su desarrollo incluyen: 1) búsqueda y colecta en campo, 2) bioensayos para la selección de cepas por su virulencia, 3) producción de unidades infectivas en sustratos sólidos, 4) formulación, 5) pruebas de seguridad biológica sobre insectos no blanco y mamíferos, 6) evaluación de equipos de aplicación y 7) evaluación de la efectividad biológica en campo (Sánchez-González *et al.*, 2015). A continuación, se describen brevemente las etapas desarrolladas y el impacto en los niveles de control y la superficie atendida.

Búsqueda y colecta en campo

En la actualidad, la exploración para la recolecta de agentes de control biológico se ha intensificado de manera general, con el propósito de obtener cepas con diferentes rangos de huéspedes, cultivos y una tolerancia ambiental adecuada (persistencia), además de una alta virulencia y otros rasgos que podrían ser beneficiosos durante su aplicación en campo (Solter, Hajek & Lacey, 2017). Como ejemplo, tenemos la experiencia del CNRCB que, desde su instauración, en 1991, en Tecomán, Colima, recolecta directa e indirecta a través de la exploración ha sido una actividad continua. La recolección directa consiste en la búsqueda *in situ* del HEP, en donde está presente la plaga objetivo. Por su parte, la recolecta indirecta consiste en tomar muestras de suelo de la rizosfera, de manera sistemática, para su análisis en laboratorio (Figura 2) (Berlanga-Padilla, Ayala-Zermeño, Montesinos-Matías & Rodríguez-Rodríguez, 2016).

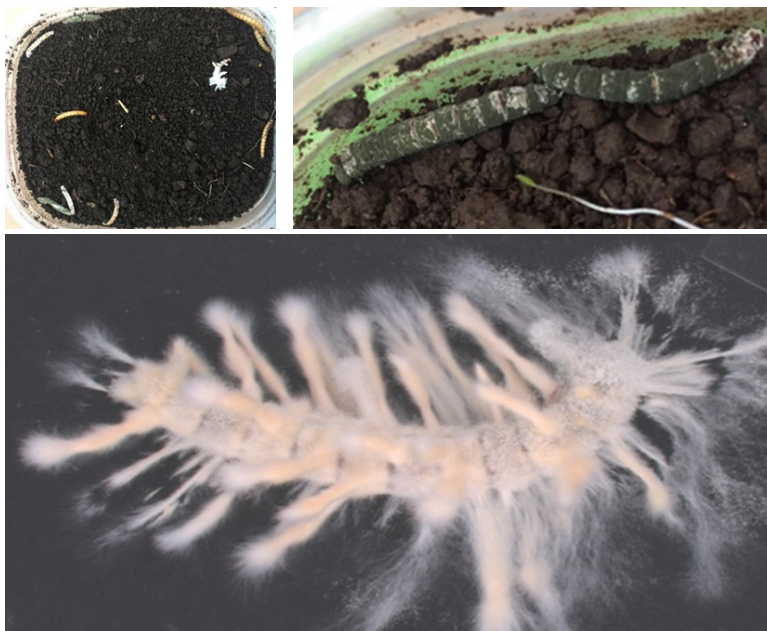


Figura 2. Obtención de aislamientos de hongos entomopatógenos de muestras de suelo con *Tenebrio molitor*. **Nota.** Adaptado de *Aislamiento e identificación de hongos entomopatógenos asociados al cultivo del agave (*Agave cupreata* Trel. & Bergue) para el control de *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) en Michoacán*, de Perla Chávez-Maldonado, 2023. **Fuente:** <https://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx/images/PDF/listastesis/licenciatura.pdf>.

Posterior al aislamiento y confirmación de la identidad morfológica de hongo obtenido en laboratorio, el siguiente paso es su preservación en técnicas que aseguren su viabilidad a largo plazo para asegurar el cuidado de la integridad genética y la no degeneración en su virulencia (Ayala-Zermeño *et al.* 2023). Derivado de las actividades de búsqueda y recolecta en campo de HEP, ha sido posible conformar la Colección de hongos del CNRCB, que al día de hoy cuentan con más de 1 200 aislados de más de 40 tipos de cultivos agrícolas y de las 31 entidades de la República Mexicana¹ (Figura 3).

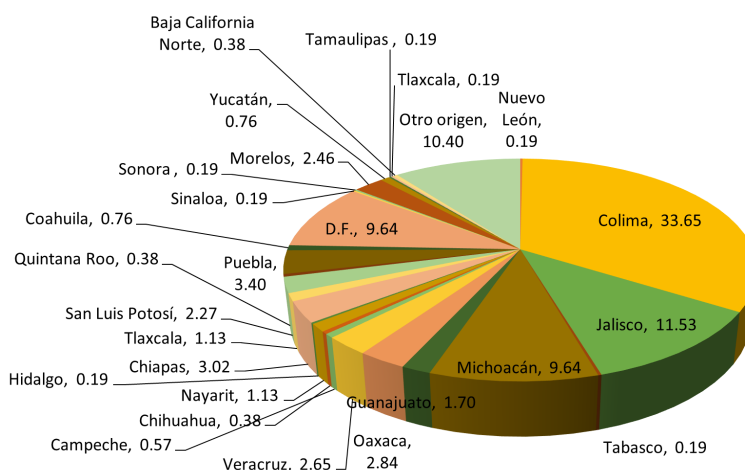


Figura 3. Distribución en porcentaje de cepas de la CHE por entidad federativa de origen

¹ https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/889315/Cat_logo_CHE_2024__1_.pdf



El valor de esta colección de HEP del CNRCB radica en el origen geográfico de sus aislamientos ya que tres cuartas partes del total están georreferenciados y abarcan diferentes regiones agroclimáticas (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2024). Por ejemplo, de zonas tropicales, del cultivo de limón se tiene cepas de hongos del estado de Colima, San Luis Potosí, Oaxaca; subtropicales, aislamientos de broca de café y roya, de Chiapas, Colima, Nayarit, Guerrero y Veracruz; y de climas templados, para el cultivo de maíz, Coahuila, Jalisco, Michoacán, Guanajuato y Zacatecas entre otros estados. Debido a esta diversidad de aislamientos de la colección del CNRCB, en la actualidad es el principal reservorio para la adquisición de cepas de hongos para desarrollo de micoïnsecticidas. Del 2013 al 2023 se atendieron 184 solicitudes para proyectos de investigación y 106 solicitudes para su comercialización (pago de productos e5cinco), respectivamente. Continuar con la búsqueda de HEP en nichos no explorados permitirá detectar nuevas especies y variedades, con potencial aplicación en la sanidad vegetal en el futuro.

Bioensayos para la selección de cepas por virulencia

Un paso importante para el desarrollo de bioïnsecticidas formulados con HEP es determinar la patogenicidad y su virulencia, por lo cual inicialmente deben establecerse bioensayos en condiciones de laboratorio. Un bioensayo puede definirse como la evaluación de un estímulo con base en la respuesta que se obtiene de la interacción huésped - patógeno (Chan-Cupul, 2019). En este sentido, el estímulo es el HEP y la respuesta es la muerte o efecto fisiológico del huésped (Figura 4), (e.g. reducción de la alimentación, actividad física y pérdida de habilidad de movimiento) (Tamayo-Mejía & Guzmán-Franco 2010). Con los bioensayos se determina la virulencia de uno o varios aislamientos o cepas, la capacidad epizootica y factores bióticos y abióticos que la impiden o favorecen (Butt & Goettel 2000). Los bioensayos también permiten determinar la amplitud de huéspedes del HEP (Altinok & Sami Koca 2019), lo cual es importante ya que en el control microbiano otro de los objetivos es que los agentes de control sean específicos, de tal modo que no se afecten otros organismos del entorno donde serán liberados.

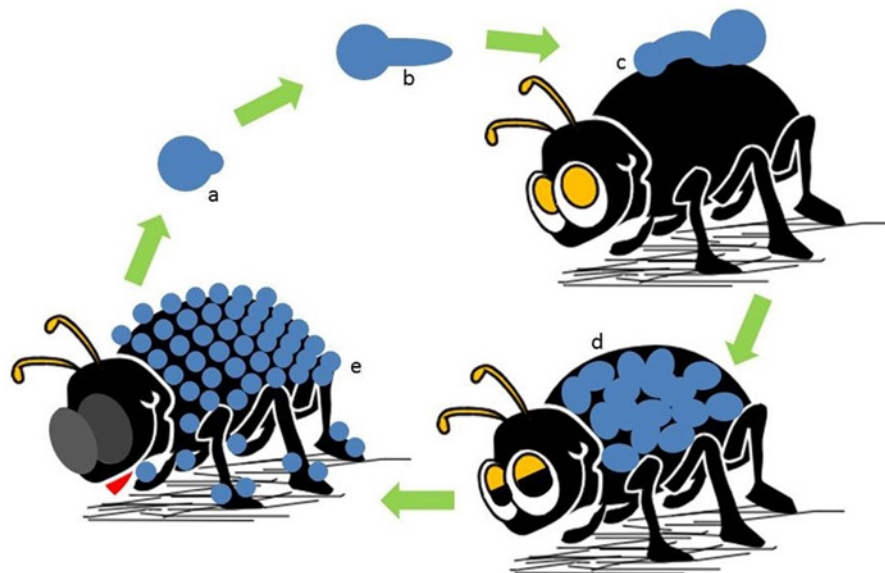


Figura 4. Modo de infección de los hongos entomopatógenos. a) unidad infectiva (conidio) proveniente de cadáveres infectados o de un formulado, b) conidio germinado, c) desarrollo del tubo germinativo y formación del apesporio sobre la cutícula, d) cuando tiene éxito en la penetración del exoesqueleto, entra al cuerpo del insecto, y produce cuerpos hifales para terminar de invadir todos los tejidos del insecto, y finalmente e) el hongo emerge del cadáver para producir más conidios). **Nota.** Adaptado de “Strawberry IPM study 2012: Managing insect pests with chemical, botanical, and microbial pesticides”, S. K. Dara, 2013, E-JOURNAL OF ENTOMOLOGY AND BIOLOGICALS. <https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=9595>

Sobre la experiencia del CNRCB (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2024), diferentes métodos de bioensayos se han empleado para evaluar un gran número de aislados endémicos, los cuales han permitido seleccionar cepas virulentas que actualmente se utilizan en programas de control biológico que opera el SENASICA (Arredondo-Bernal & Rodríguez-Vélez 2020). La estrategia empleada para el tamizado de cepas es el siguiente: 1) selección del hongo por huésped original (SADR-SENASICA, s.f.), es decir que el HEP se haya aislado de la plaga que se desea controlar o de un huésped emparentado taxonómicamente; 2) su origen geográfico, que se haya obtenido de una región donde las condiciones climáticas tengan afinidad durante su aplicación en campo y 3) del mismo cultivo agrícola donde se pretende emplear. Posterior a la selección de los HEP del catálogo, se inicia con los bioensayos, acorde al estadio biológico de la plaga que sea más susceptible. Por ejemplo, para buscar alternativas de control del psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri*, vector del Huanglongbing (HLB), se evaluaron 14 cepas de *Metarhizium*, 12 de *Isaria* y dos de *Beauveria* sobre ninfas y adultos de la plaga. De los resultados de bioensayo en laboratorio, la cepa de *Isaria javanica* CHE-CNRCB 307 resultó promisorio para el control, al ser la única que provocó una mortalidad mayor al 95% en ninfas y adultos de *Diaphorina citri* (Mellín-Rosas, Sánchez-González, Cruz-Ávalos, Montesinos-Matías, & Arredondo-Bernal, 2016).



Sin embargo, por desempeño de su efectividad biológica en entidades y regiones cítricas, se emplean cuatro cepas *Isaria javanica* CHE-CNRCB 303 (Tamaulipas), *Isaria javanica* CHE-CNRCB 307 (Colima, Jalisco, Nayarit y Oaxaca), *Isaria javanica* CHE-CNRCB 305 y 307 (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) y *Metarhizium anisopliae* CHE-CNRCB 224 (Hidalgo, San Luis Potosí y Veracruz) (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural/ Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2020).

Producción de unidades infectivas en sustrato sólido

Para el uso de HEP contra insectos plaga se requiere de la producción de conidios o blastosporas, que son las unidades infectivas que enferman a las plagas. Las formas de conidios pueden ser producidos en fermentación en medio sólido (también conocido como fermentación bifásica) o cultivo líquido (también conocido fermentación sumergida o cultivo sumergido). Estos métodos de cultivo ponen a disposición los requerimientos básicos para el crecimiento micelial y conidiación de los hongos, fuentes nutricionales (carbono y nitrógeno), pH, temperatura y asegurar un buen intercambio gaseoso de oxígeno y CO₂ (Vega, Meyling, Luangsa-ard, & Blackwell, 2012).

Previo a la inoculación de los hongos en sustrato sólido o líquido, se involucra la producción *in vitro* en medio superficial como PDA, SDAY, SDAY/4 o medios específicos que se pueden formular a base de quitina para mejorar las características de crecimiento y virulencia (Montesinos-Matías *et al.* 2021). Los conidios de HEP producidos son cosechados con un volumen de Tween 80 (0.05%) y la superficie es raspada con una espátula, para luego ser agitados y filtrados con capas de gasa esteril para descartar el micelio. A continuación, se contabilizan los conidios en cámara de Neubauer para estandarizar suspensiones que se emplean como inóculo en la producción en medio sólido o cultivo sumergido. Durante la evaluación de producción de HEP en sustrato sólido, nos permite seleccionar las cepas con mayor rendimiento y productividad, es vital realizar este estudio debido a que se podría dar el caso de que cepas virulentas no superen esta prueba y deben ser descartadas, considerando el costo beneficio de producción.

En el CNRCB se utiliza el arroz como sustrato principal para la producción de HEP (Figura 5), los cuales posteriormente se emplean en programas de control biológico implementados por el SENASICA (Arredondo-Bernal & Rodríguez-Vélez, 2020) es el caso del psílido asiático de los cítricos, pulgón café de los cítricos, mosca del vinagre, chapulines, langosta y otros que están en desarrollo. Como ejemplo, las condiciones específicas de producción se pueden consultar en el *Manual de producción de Isaria javanica (Bally) Samson & Hywel-Jones para el control de Diaphorina citri* del SENASICA.



Figura 5. Esquema general de producción de HEP en el CNRCB, cultivo superficial, producción en arroz, secado y cosecha de conidios (Área de hongos entomopatógenos del CNRCB)

Pruebas de seguridad biológica sobre insectos no blanco y mamíferos

Debido al aumento en la demanda de la población de productos hortofrutícolas libre de residuos químicos y el uso de tecnologías que respeten el equilibrio natural de los agro ecosistemas durante su producción, el desarrollo de micoinsecticidas es una alternativa real en la sanidad vegetal. Sin embargo, durante su aplicación es necesario conocer el efecto de los agentes de control microbiano sobre organismos no blanco, con atención puntual a aquellos que tienen un amplio rango de huéspedes. Los agentes de control microbiano, antes de que puedan ser utilizados en campo, tienen que sujetarse a todas las pruebas técnicas requeridas para garantizar la protección de la salud humana y un bajo impacto ambiental (Toriello & Brunner Mendoza 2020).

En México, para cumplir con la regulación de la producción, manejo, distribución y aplicaciones de los plaguicidas, es facultad de tres dependencias federales. Los aspectos sanitarios son regulados por la Secretaría de Salud (SS); el impacto al ambiente por la Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la eficacia biológica de los productos para uso agrícola por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). El registro sanitario de plaguicidas es una autorización sanitaria que emite la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) en coordinación con la SEMARNAT y SADER, el cual garantiza la eficacia y seguridad del producto registrado, y es requisito necesario para su venta y uso en México (Toriello & Brunner-Mendoza, 2020).

Las cepas de HEP que han resultado promisorias para el control de plagas, implementados por el SENASICA, los estudios de bioseguridad fueron realizados por el Departamento de Microbiología y Parasitología, Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (Brunner-Mendoza, Navarro-Barranco, León-Mancilla, Pérez-Torres, & Toriello, 2017; Brunner-Mendoza, Reyes-Montes, Moonjely, Bidochka, & Toriello, 2019). La inocuidad de las cepas de HEP del CNRCB fue determinada en ratones, cobayos, hámsteres y conejos utilizados para experimentación. Analizando las interacciones entre HEP y el huésped, la enfermedad ocurre



únicamente en hospederos susceptibles, por el contrario, en los mamíferos antes mencionados fueron incapaces de causar daño, en este caso el hospedero elimina el hongo sin problema, por lo que ya no está disponible el mecanismo patogénico (Toriello & Brunner-Mendoza, 2020).

En relación a los metabolitos secundarios que pueden ser secretados en pequeñas cantidades y pueden variar entre especies de HEP, al día de hoy no se han encontrado riesgos por sí mismos a lo largo de varios ensayos y exposiciones en la naturaleza; sin embargo, el desarrollo de nuevas formulaciones y combinaciones de cepas sugiere que se deben realizar evaluaciones detalladas en el futuro para evitar que ocurran efectos no previstos, especialmente en el impacto a organismos no blancos (Toriello & Brunner-Mendoza, 2020).

Evaluación de efectividad biológica en campo

Los agentes de control microbiano se usaron por primera vez mucho antes de que los insecticidas sintéticos fueran desarrollados. Fue Metchnikoff quien aplicó por primera vez, en 1878, un enfoque biotecnológico sobre el cultivo de HEP; sin embargo, fue Krassistschik el encargado de realizar la primera aplicación en 1888 a gran escala, en Rusia (Arcas, 2019). Desafortunadamente, los avances logrados a partir de estos hallazgos fueron más lentos de lo esperado, en buena medida debido a que entre los años 1930 y 1940 aparecieron en el mercado los plaguicidas sintéticos con marcada efectividad, lo que redujo el interés por los micoinsecticidas. No fue hasta la década de 1960, cuando se hicieron aparentes los problemas ambientales y de salud, asociados al uso de insecticidas químicos, que se retomó el interés por los bioinsecticidas fúngicos (Glare, 2004).

En general, las aplicaciones de productos, ya sea de origen químico o biológico en los cultivos, son realizadas como un proceso automático, donde se asume que todas las variables que influyen en la aplicación han sido tomadas en cuenta. Esta situación no es del todo cierta y tiene amplias repercusiones en el efecto biológico que se produce, lo cual se puede verificar en la variabilidad de los resultados de control que se obtienen lo que hace necesario que se realicen nuevas aplicaciones de los insumos biológico o, peor aún, que se desaliente el uso de estos (Tamayo-Mejía, Alatorre-Rosas, Delgado-Fernández, & Ocampo-Hernández, 2020). Por lo tanto, previo a la aspersión HEP, se deben considerar los siguientes aspectos importantes: tipo de cultivo (densidad, altura, hortícola, frutal), plaga a controlar (estadio más susceptible), las condiciones ambientales (alta humedad >90), el tipo de mós a utilizar (especificidad con el huésped), el equipo y proceso de aplicación (calibración, boquilla, volumen de agua, presión de aplicación, uso de coadyuvantes) y su compatibilidad con agroquímicos, así como con depredadores y parasitoides



(Tamayo-Mejía *et al.*, 2020). La combinación de todos estos factores debe dar como resultado la definición de la «ventana de control» para cada plaga en particular, y el cual se ilustra en la Figura 6.



Figura 6. Interacciones del huésped, entomopatógeno, cultivo, ambiente y tecnología de aspersión en la definición de la Ventana de control para el uso de patógeno en el manejo de plagas (Tomado de Tamayo-Mejía *et al.*, 2020)

El CNRCB ha realizado un gran número de evaluaciones en campo con los HEP que han resultado de interés para su aplicación inundativa de acuerdo al tipo de plaga y cultivo. En todas estas evaluaciones se han considerado los factores bióticos (estadio de la plaga y hábitos, HEP (viabilidad y virulencia), altura del cultivo) y abióticos (humedad relativa, temperatura, dirección del viento, horario del día y equipo de aplicación) para elegir el momento más oportuno de la aplicación.

De manera alternativa, la Norma Oficial Mexicana NOM-032-FITO-1995 es la que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarios para la realización de estudios de efectividad biológica de plaguicidas agrícolas y su dictamen técnico para fines de registro. Para plaguicidas microbianos los valores de efectividad biológica pueden ser igual o mayores al 50%, y que el producto ensayado demuestre ser al menos del mismo orden que el del producto utilizado como testigo regional (plaguicida de referencia, de efectividad biológica conocida, registrado en México, que se usa en una determinada región y se incluye como un tratamiento dentro de la evaluación) (NOM-032).

A continuación, en la Tabla 1 se muestra la superficie atendida (ha) por cepa (s) de HEP de programas de control biológico vigentes al 2023, así como los estados



donde se han realizado las aplicaciones y los niveles de control alcanzados. Por citar un ejemplo, en el año 2023, para el control *Diaphorina*, se atendió 7 630.55 ha de cítricos, lo cual benefició a 910 productores (SICAFI, 2024). A nivel nacional, un total de 131 062.3 ha se han protegido con cepas de HEP del SENASICA, desde el 2012. Estas acciones de control microbiano han evitado el uso de insecticidas sintéticos, que afectan considerablemente a la fauna benéfica, a la salud humana y la contaminación de mantos freáticos. La cipermetrina es uno de los insecticidas recomendado para el control del psílido asiático de los cítricos, a una dosis de 0.5 L/ha; con el uso de HEP para su control, se estima que se evitó la aplicación de 51 441 L de este principio activo.

Tabla 1. Superficie atendida (ha) por cepas de hongos entomopatógenos en los programas implementados por el SENASICA

Programa	Cepas	Periodo	Niveles de control	Superficie atendida	Estados
Langosta/ <i>Schistocerca piceifrons piceifrons</i>	<i>Metarhizium acridum</i> CHE-CNRCB 206, 213	2009-2022	86-90%	15 844.5 ha	Campeche, Chiapas, Colima, Hidalgo, Oaxaca, San Luis Potosí, Tabasco, Veracruz y Yucatán
Psílido asiático de los cítricos/ <i>Diaphorina citri</i>	<i>Cordyceps javanica</i> CHE-CNRCB 303, 305 y 307	2012-2023	60-81.8%	102 881.8 ha	Colima, Hidalgo, Jalisco, Nayarit, Oaxaca, San Luis Potosí y Veracruz
Pulgón café de los cítricos/ <i>Toxoptera citricida</i>	<i>Cordyceps javanica</i> CHE-CNRCB 305	2009-2015	>90%	12 336 ha	Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tabasco, Veracruz y Yucatán

Conclusiones

Los HEP son microorganismos capaces de infectar y eliminar a las plagas, y tienen un gran potencial dentro de las estrategias de MIP. Su uso cada vez se recomienda más, debido a que los plaguicidas sintéticos han ocasionado resistencia en los insectos, ha disminuido los enemigos naturales, por lo que la búsqueda de agentes de control microbiano ecológicos sigue siendo una necesidad. A pesar de los avances científicos y de los programas desarrollados por el SENASICA, aún existe la necesidad de realizar estudios para ampliar el número de especies aplicables en el manejo de plagas y mejorar su desempeño en campo, así como aumentar la conciencia de los usuarios sobre su uso correcto, con el objetivo de establecer su adopción generalizada.

Conflicto de interés

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.



Financiamiento

El presente trabajo contó con el financiamiento del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA).

Agradecimiento

Se agradece la información proporcionada por el personal técnico de los OASV, sobre superficie atendida con HEP. A la Ing. María Dolores García Cancino y a los revisores por sus valiosos comentarios para mejorar esta versión del artículo.

Referencias

- Altinok, M.A. & Sami Koca, A. (2019). Modes of Action of Entomopathogenic Fungi. *Current Trends in Natural Sciences*, 8(16), 117-124. https://www.researchgate.net/publication/338390298_Modes_of_Action_of_Entomopathogenic_Fungi
- Arcas, J. A. (2019). Producción de hongos entomopatógenos. En C.C. Lopez Lastra & R.E. Lecuona (Eds.), *Micopatología de artrópodos* (pp.193-231). INTA Ediciones.
- Arredondo-Bernal, H.C. & Rodríguez-Vélez, B. (2020). Biological Control in Mexico. En J.C. van Lenteren, V.H.P. Bueno, M.G. Luna & Y.C. Colmenarez (eds.), *Biological Control in Latin America and the Caribbean: its Rich History and Bright Future* (pp. 308-335). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781789242430.0308>
- Ayala-Zermeño, M.A., Berlanga-Padilla A.M., Regla-Márquez, C.F., Lino-López G.J., Muñiz-Paredes, F., Montesinos-Matías. R. & Sánchez-González. J.A. (2023). Long-term preservation and genetic stability of entomopathogenic fungal species. *Journal of Microbiological Methods*, 208, 106711. DOI: 10.1016/j.mimet.2023.106711.
- Berlanga-Padilla, A.M., Ayala-Zermeño, M.A., Montesinos-Matías, R. & Rodríguez Rodríguez, J.C. (2016). *Manual de Exploración para la Colecta de Hongos Entomopatógenos* (pp. 54). Centro Nacional de Referencia de Control Biológico. Dirección General de Sanidad Vegetal, SAGARPA, SENASICA.
- Brunner-Mendoza, C., Navarro-Barranco, H., León-Mancilla, B., Pérez-Torres, A. & Toriello, C. (2017). Biosafety of an entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* in an acute dermal test in rabbits. *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 36(1), 12–18. <https://doi.org/10.3109/15569527.2016.1156122>
- Brunner-Mendoza, C., Reyes-Montes, M. del R., Moonjely, S., Bidochka, M. J., & Toriello, C. (2019). A review on the genus *Metarhizium* as an entomopathogenic microbial biocontrol agent with emphasis on its use and utility in Mexico. *Biocontrol Science and Technology*, 29(1), 83–102. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1531111>
- Butt, T.M. & Goettel, M.S. (2000). Bioassays of Entomogenous Fungi. En A. Navon y K.R.S. Ascher (eds.), *Bioassays of Entomopathogenic Microbes and Nematodes* (pp. 141-195). CAB International. <http://dx.doi.org/10.1079/9780851994222.0141>



- Chan-Cupul, W. (2019). *Diseño De Bioensayos Para La Evaluación De Hongos Entomopatógenos*. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Colima.
- Chávez-Maldonado, P. (2023). Aislamiento e identificación de hongos entomopatógenos asociados al cultivo del agave (*Agave cupreata* Trel. & Bergue) para el control de *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) en Michoacán. <https://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx/images/PDF/listastesis/licenciatura.pdf>
- Dara, S. K. (2013). Strawberry IPM study 2012: Managing insect pests with chemical, botanical, and microbial pesticides. *E-JOURNAL OF ENTOMOLOGY AND BIOLOGICALS*. <https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=9595>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (03 de abril 2019). *New standards to curb the global spread of plant pests and diseases*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/New-standards-to-curb-the-global-spread-of-plant-pests-and-diseases/en>
- García-Espinoza, F., Yousef-Yousef, M., García del Rosal, M.J., Cuenca-Medina, M. & Quesada-Moraga, E. (2024). Greenhouse melon crop protection and production through the compatible use of a parasitoid with endophytic entomopathogenic ascomycetes. *Journal of Pest Science*. <https://doi.org/10.1007/s10340-023-01735-0>
- Glare, T. R. (2004). Biotechnological potential of entomopathogenic fungi. En D. K. Arora (ed.), *Fungal biotechnology in agricultural, food, and environmental applications* (pp. 79-90). Marcel Dekker Inc. <https://doi.org/10.1201/9780203913369.ch7>
- Goettel, M. & Inglis, G.D. (1997). Fungi Hyphomycetes. En L. Lacey (ed.), *Manual of techniques in insect pathology* (p. 213-249). USDA, ARS, Academic Press.
- Mellín-Rosas, M.A., Sánchez-González, J.A., Cruz-Ávalos, A.M., Montesinos-Matías, R., & Arredondo-Bernal, H.C. (2016). Patogenicidad de cepas de hongos entomopatógenos sobre *Diaphorina citri* Kuwayama en condiciones de laboratorio. *Southwestern Entomologist*, 41(3), 791-800. <https://doi.org/10.3958/059.041.0321>
- Montesinos-Matías, R., Ordaz-Hernández, A., Ángel-Cuapio, A., Colin-Bonifacio, Y., García-García, R.E., Ángel-Sahagún, C.A. & Arredondo-Bernal, H.C. (2021). Principal component analysis of the biological characteristics of entomopathogenic fungi in nutrient-limited and cuticle-based media. *Journal of Basic Microbiology*, 61,147–156. <https://doi.org/10.1002/jobm.202000627>
- Quesada-Moraga, E., Yousef-Naef, M. & Garrido-Jurado, I. (2020). Advances in the use of entomopathogenic fungi as biopesticides in suppressing crop insect pests. En N.N. Birch y T. Glare (eds.), *Biopesticides for sustainable agriculture* (pp. 63–98). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0073.05>



- Sánchez-González, J.A., Mellín-Rosas, M.A., Arredondo-Bernal, H.C., Vizcarra-Valdez, N.I., Gonzalez-Hernández, A. & Montesinos-Matías, R. (2015). Psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). En H.C. Arredondo & L.A. Rodríguez del Bosque (eds.), *Casos de control biológico en México*, Vol. 2 (pp. 339-372). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. (1 de agosto 1997). *NORMA Oficial Mexicana NOM-032-FITO-1995, Por la que se establecen los requisitos y especificaciones fitosanitarios para la realización de estudios de efectividad biológica de plaguicidas agrícolas y su dictamen técnico*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural - Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2020). *Manual operativo de la campaña contra plagas de los cítricos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/614759/Manual_operativo_Plagas_de_los_Citricos.pdf.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2024). *Colección de hongos entomopatógenos (CHE)*. (<https://www.gob.mx/senasica/documentos/coleccion-de-hongos-entomopatogenos>).
- Sistema de Información de Campañas Fitosanitarias. (2024). *Superficie atendida con hongos entomopatógenos para el control del Psílido Asiático de los Cítricos y los productores beneficiados para el año 2023*. <https://www.sicafi.gob.mx/DGSV/>
- Solter L.F., Hajek A.E., Lacey L.A. (2017). Exploration for entomopathogens. En L.A. Lacey (ed), *Microbial control of insect and mite pests: from theory to practice* (pp. 13–23). Elsevier Inc.. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803527-6.00002-0>
- Tamayo-Mejía, F. & Guzmán-Franco, A. (2010). *Bioensayos con hongos entomopatógenos* (pp. 115), XXXIII Congreso Nacional de Control Biológico, Manual del participante, Curso-taller “Control de calidad de insecticidas microbianos: Hongos y nematodos entomopatógenos” 8-10 de noviembre de 2010, Uruapan, Michoacán, México.
- Tamayo-Mejía, F., Alatorre-Rosas, R., Delgado-Fernández, S. & Ocampo-Hernández J.A. (2020). Principios de aplicación de entomopatógenos. En H.C. Arredondo-Bernal, F. Tamayo-Mejía & L.A. Rodríguez del Bosque (eds.), *Fundamentos y Práctica del Control Biológico de Plagas y Enfermedades* (pp. 405-425). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Toriello, C. & Brunner-Mendoza, C. (2020). Seguridad Biológica de microorganismos, con énfasis en hongos entomopatógenos. En H.C. Arredondo-Bernal, F. Tamayo-Mejía & L.A. Rodríguez del Bosque (eds.), *Fundamentos y Práctica del Control Biológico de Plagas y Enfermedades* (pp. 331-341). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Vega, F. E., Meyling, N.V., Luangsa-ard, J.J. & Blackwell, M. (2012). Fungal entomopathogens. En F.E. Vega y H.K. Kaya (eds.), *Insect pathology*, 2nd Ed. (pp. 171–220). Academic Press.

Micoinsecticidas, un engranaje más del proceso de sostenibilidad en la agricultura mexicana

Karla Tatiana Murillo-Alonso^{1*}, Víctor Manuel Hernández-Velázquez², Jhony Navat Enríquez-Vara³

¹Laboratorio de Tecnología Sustentable, LABTECSUS, Jiutepec, Morelos C.P. 62576, México

²Laboratorio de Control Biológico, Centro de Investigación en Biotecnología, Cuernavaca, Morelos, México

³Laboratorio de Entomología, CONAHCYT-CIATEJ, Biotecnología Vegetal, Zapopan, Jalisco, México

*Autor de correspondencia: ktmurillo@gmail.com, murillo.alonso@labtecsus.com

Resumen

Palabras clave:

control biológico, hongos entomopatógenos, insecticidas biológicos, *Metarhizium*, plagas agrícolas

La gran problemática de combatir a los insectos plagas que pueden terminar con los cultivos rápidamente ha generado la dependencia y abuso de los insecticidas químicos, como consecuencia se ha ocasionado resistencia en los insectos y graves problemas ambientales y de salud humana. La Organización de las Naciones Unidas tiene como objetivo encaminar la agricultura hacia la sostenibilidad; para lograrlo el control biológico se muestra como una alternativa donde los hongos entomopatógenos demuestran ser microorganismos funcionales ya que se ha logrado controlar insectos invasores con daños severos en la agricultura como la langosta, el salivazo y la mosca blanca, entre otros insectos considerados plagas. En conclusión, se ha logrado un avance significativo de los micoinsecticidas como herramienta en el manejo de plagas en México y su uso encamina la sostenibilidad agrícola.

Introducción

La producción de alimentos a nivel mundial se ha incrementado debido al aumento de la población humana, lo que representa un reto para los diferentes países. Sin embargo, los rendimientos de los cultivos agrícolas pueden estar comprometidos por variaciones en el clima, disponibilidad de agua para regar los cultivos, nutrición de los cultivos y el ataque de plagas y enfermedades. Por ejemplo, los insectos y fitopatógenos pueden ocasionar pérdidas en los rendimientos de los cereales básicos desde el 17 al 30 % (Savary *et al.*, 2019). Actualmente, los plaguicidas son utilizados para la protección de los cultivos de las plagas, aun cuando, usarlos indiscriminadamente y sin conocimiento técnico ha provo-

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
125-135. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12765629>

Recibido: 18 abril 2024
Revisado: 16 de mayo 2024
Aceptado: 05 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



cado daños al medio ambiente, disminución de organismos no blanco, generación de poblaciones resistentes, contaminación de suministros de agua dulce, daños a la salud de los aplicadores y personas relacionadas con el manejo de los agroquímicos (Baddi *et al.*, 1994; Pretty, 2018).

Una de las alternativas ecológicas en el manejo de las poblaciones de insectos plaga es el uso de agentes de control biológico. Las poblaciones de los insectos de manera natural se encuentran reguladas por enemigos naturales como: depredadores, parasitoides y microorganismos entomopatógenos. Estos últimos, tienen la capacidad de enfermar y causar la muerte de los insectos (Butt *et al.*, 2016). El empleo de los microorganismos para el control de plagas se le denomina control microbiano de plagas donde se pueden aplicar bioinsecticidas a base de bacterias, hongos y virus entomopatógenos. Uno de los bioinsumos ampliamente utilizados en México son los micoinsecticidas, estos actúan por contacto sobre un amplio número de insectos plaga de cultivos básicos, hortícolas e industriales (Enríquez-Vara, 2021).

Los micoinsecticidas tienen el potencial de coadyuvar en el manejo de poblaciones de insectos plaga por lo que se han convertido en una alternativa en la producción agrícola sostenible de alimentos y contribuir en la soberanía alimentaria de los países como México. En este documento se abordará el papel que juegan los micoinsecticidas en la agricultura, su modo de acción y un análisis de la disponibilidad de productos comerciales disponibles en el mercado para el manejo de diferentes insectos.

Agricultura sostenible

La Organización de las Naciones Unidas marcó el inicio del modelo sostenible con el Informe Brundtland en 1987, y comprende en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de garantizar sus propias necesidades y simultáneamente que se garantice la rentabilidad, la salud ambiental y la equidad social y económica de la población (FAO, 2015). El fundamento de la sostenibilidad conlleva a encontrar un equilibrio entre el derecho a una alimentación con valor nutritivo para la población mundial y la protección de los recursos naturales y de los diferentes ecosistemas de la tierra (FAO, 2015). También establece cinco principios fundamentales de sostenibilidad para la alimentación y agricultura. Uno de ellos es proteger e impulsar los recursos naturales, donde involucran recursos ambientales de suelo, agua, aire y también recursos biológicos como la flora, la fauna y los microorganismos para el beneficio social.

La generación y el uso de prácticas agrícolas no perjudiciales al ecosistema constituyen a la agricultura sostenible e involucra estrategias de Manejo Agroecológico de Plagas (MAP) que se cimienta en los principios agroecológicos y busca integrar alternativas para solucionar problemas agrícolas más allá del uso de agroquímicos,

considera el origen y causas de la incidencia de las plagas, aspectos ecológicos y del entorno, así como los cultivos y las plagas (SADER-SENASICA, 2019). Manejo Integrado de Plagas (MIP) considera todas las técnicas disponibles para combatir las plagas; estas pueden ser químicas, físicas o bien biológicas y pueden ser empleadas de manera independiente o en combinación para la posterior integración de medidas apropiadas que disminuyen el desarrollo de poblaciones de plagas (FAO, 2019). Ambos manejos de plagas tienen como objetivo lograr un control sostenible y reducir la dependencia hacia los insecticidas químicos y sus efectos nocivos e involucran al control biológico, como se muestra en la Figura 1.

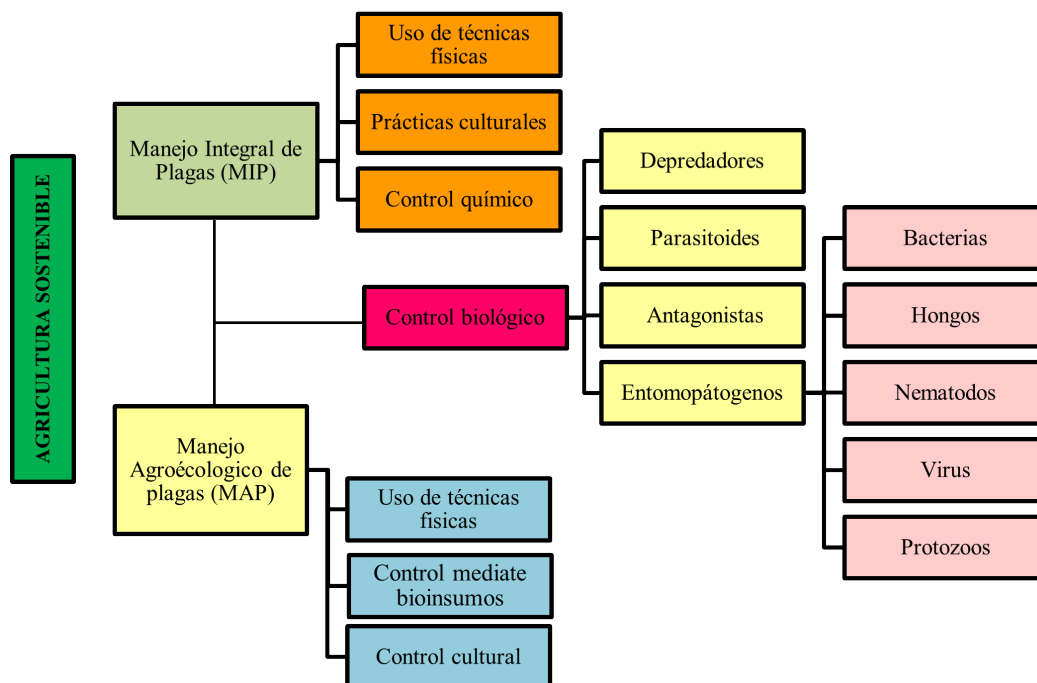


Figura 1. Convergencia del control biológico en la agricultura sostenible (propia)

Control biológico

El control biológico es el uso de enemigos naturales como parasitoides, depredadores y microorganismos entomopatógenos cuyo objetivo es mantener baja densidad de la población de un organismo considerado plaga (De Bach, 1964). La acción de los agentes de control biológico puede ocurrir de manera natural sin participación del hombre o bien involucrando su intervención mediante tres estrategias de control biológico: por introducción (clásico), conservación y aumento (incremento). El control biológico clásico consiste en introducir un agente de control biológico nativo de una plaga invasora para disminuir las poblaciones de los insectos a largo plazo. La estrategia por conservación consiste en mantener el hábitat lo menos perturbado para favorecer la persistencia e incremento de los enemigos naturales en los agroecosistemas. La tercera estrategia por aumento de los enemigos naturales



consiste en liberar grandes cantidades de agentes de control biológico con el objetivo de incrementar las probabilidades de contacto entre las plagas y sus enemigos naturales, esta estrategia proporciona un control casi inmediato de las plagas sobre todo cuando se utilizan bacterias y virus entomopatógenos. El control biológico por aumento es una de las estrategias que se usa de manera generalizada en la agricultura para liberar a los enemigos naturales (Barrera, 2020).

Micoinsectidas y su acción insecticida

Los hongos entomopatógenos se encuentran naturalmente en suelos de diferentes hábitats en todo el mundo. Existen más de 1 000 especies de hongos entomopatógenos pertenecientes a las familias Clavicipitaceae, Cordycipitaceae y Ophiocordycipitaceae de acuerdo con las bases de datos científicas Index fungorum y MycoBank. Los hongos entomopatógenos tienen como función principal la acción insecticida. No obstante, también pueden ser endófitos (estar presente dentro de la planta sin causarle daño) y proteger a las plantas de patógenos y herbívoros, incluso algunos pueden presentar características similares a una micorriza y funcionar como promotores de crecimiento (Behie, Jones, & Bidochka, 2015; Butt *et al.*, 2016).

El modo de acción de los hongos entomopatógenos es por contacto y basta que un par de conidios lleguen al insecto por medio de una aspersion dirigida o que el insecto haya pasado por un sitio donde abundan estos microorganismos como lo es el suelo, e incluso que los conidios hayan sido transportados por el viento para llegar a un insecto. El primer contacto entre los conidios (quien son los encargados de la acción insecticida) y la superficie del insecto ocurre a través de la cutícula. Las condiciones ambientales como una alta humedad favorecen el proceso de germinación del conidio donde un tubo germinal rastrea e identifica la superficie del insecto favoreciendo la adhesión del conidio a la cutícula y la formación de un apresorio, posteriormente se lleva a cabo la penetración de las hifas al interior del insecto mediante degradación enzimática, principalmente por la acción de proteasas, lipasas y quitinasas y presión del tubo germinal sobre la cutícula del insecto provocando la ruptura en la epicutícula y procutícula. Sin embargo, el insecto al censar la invasión fúngica activa su sistema de defensa contra patógenos a través de procesos de melanización, esclerotización, nodulación, fagocitosis, y encapsulamiento tratando que el hongo no lleve a cabo su acción. No obstante, el hongo tiene mecanismos para evadir la respuesta inmunitaria del insecto, por ejemplo, invadiendo diversos sitios y cambiando la conformación de los componentes de su pared celular y de su estructura física para que no sea reconocida por los hemocitos del insecto. Los hongos se multiplican y propagan rápidamente consumiendo el interior del insecto y secretando micotoxinas que ocasionan la muerte del insecto (Tanada & Kaya, 1993; Butt *et al.*, 2016).

En México, se han recolectado y resguardado desde los años 90 cerca de 1 053 aislados de hongos nativos considerados entomopatógenos pertenecientes a los géneros *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps*, *Hirsutella*, *Simplicillium*, *Aschersonia*, *Purpureocillium*, *Entomophthora*, *Akanthomyces* y *Gibellula* (Behie *et al.*, 2015; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2017; Montesinos-Matías *et al.*, 2020; SENASICA, 2024).

El género *Metarhizium* abunda en los campos de cultivo y se han aislado especies como *M. acridum*, *M. robertsii*, *M. guizhouense*, *M. pinghaense*, *M. rileyi* (*Nomurea rileyi*) y principalmente *M. anisopliae* (Brunner *et al.*, 2017), que se ha empleado para el control de artrópodos de los órdenes Coleoptera, Dermaptera, Diptera, Hemiptera, Hymenoptera, Lepidoptera, Thysanoptera y Orthoptera. Debido a las especies de este género y su capacidad de infectar una gran variedad de insectos, es uno de los géneros de hongos entomopatógenos más empleados para el control de plagas.

En México, una de las primeras incursiones de control biológico empleando hongos entomopatógenos se realizó mediante campañas fitosanitarias para el control de la Langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons*), insecto que es capaz de ocasionar la pérdida total de cultivos como el maíz, frijol, sorgo, caña de azúcar y algodón, entre otros cultivos. El hongo *M. acridum* se empleó con éxito en el sureste del país ocasionando la reducción de bandos de langostas de más de 80% a los ocho días de su aplicación entre 2009 y 2014 en 9 974 ha. Se dejaron de aplicar 250 toneladas de paratión metílico en polvo al 2%. Este micoinsecticida ha beneficiado a la protección de miles de hectáreas de cultivos hospederos de langosta en 12 estados (Hernández-Velázquez *et al.*, 2003, 2008; SENASICA, 2009). Asimismo, este hongo ha sido empleado para el control del complejo de chapulines *Brachystola magna*, *Brachystola mexicana*, *Melanoplus differentialis* y *Sphenarium purpurascens* (Arredondo-Bernal & Rodríguez-Vélez, 2020).

Los micoinsecticidas se han utilizado con éxito en las siguientes plagas que perjudican la producción del campo mexicano:

El salivazo o mosca pinta (*Aenolamia postica*) es una de las principales plagas de la caña de azúcar. Los adultos al alimentarse de la savia inyectan toxinas que causan lesiones, esto provoca necrosis y el secamiento de las hojas, lo que afecta el rendimiento de la caña de azúcar. En 1994, el Colegio de Postgraduados (Campus Córdoba) en colaboración con el ingenio central Motzorongo, desarrollaron el primer producto micoinsecticida que contenía *Metarhizium anisopliae*, llamado Saligreen-Ma, para el control de la mosca pinta en México. Las aplicaciones de este micoinsecticida se incrementaron de 2 500 ha en 1999 a 33 000 ha en 2012; su nivel de efectividad alcanzó hasta un 70% de control del salivazo (Hernández-Rosas, 2009; Hernández-Rosas & Figueroa-Rodríguez, 2011; Alatorre-Rosas & Hernández-Rosas, 2015). Las aplicaciones de este micoinsecticida han permitido manejar las poblaciones del salivazo en la gran mayoría de los ingenios azucareros de zonas



del Golfo de México y el Pacífico por medio de colaboraciones a nivel nacional que incorpora dependencias de gobierno y laboratorios de asociaciones de productores, organizaciones y comités Cañeros.

La mosca blanca (*Bemisia tabaci*) es una plaga invasora de hábitos polípagos que daña a las plantas de manera directa al alimentarse de la savia e indirectamente mediante la excreción de melaza que promueve el crecimiento de hongos patógenos de plantas. También son consideradas transmisoras de una gran variedad virus fitopatógenos. Aunado a lo anterior, se han detectado biotipos resistentes a insecticidas. Las aplicaciones de los hongos entomopatógenos han permitido un control tanto a cielo abierto como bajo invernadero. Por ejemplo, las aplicaciones del hongo *Isaria javanica* sobre moscas blancas ocasiona el 55% de mortalidad en condiciones de invernadero (Murillo *et al.*, 2023); también el hongo *Beauveria bassiana* es empleado para el control de esta plaga con resultados alentadores (Alatorre-Rosas & Tamayo-Mejía, 2020).

La enfermedad de Huanglongbing (HLB) es causada por la infección de la bacteria *Candidatus Liberibacter*, la cual es transmitida por el psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri*. Esta enfermedad ocasiona la muerte de diferentes cítricos. Los hongos *Isaria javanica* y *Metarhizium anisopliae* se han empleado para el control de este psílido en campañas fitosanitarias y pueden ocasionar entre 60 y 82% de mortalidad (Sánchez-González *et al.*, 2015; Arredondo-Bernal & Rodríguez-Velez, 2020).

La broca del café *Hypothenemus hampei* es una de las plagas más importantes del cultivo del café a escala mundial. En México la broca ejerce un impacto directo sobre la economía del productor, ya que al perforar los frutos en campo reduce el rendimiento y merma la calidad del grano cosechado. La integración de los hongos entomopatógenos como *B. bassiana* al manejo integrado de la broca ha permitido reducir los daños de los frutos de café en las principales zonas cafetaleras mexicanas, esto se debe en parte a la facilidad de reproducción, formulación y aplicación que los productores de café han implementado (Barrera *et al.*, 2008).

Los ejemplos anteriormente comentados sobre el uso de los hongos entomopatógenos en varios cultivos de interés nacional han generado que las leyes en México integren el uso y la comercialización de algunos hongos, como lo podemos ver en el marco legal regulado por el Diario Oficial en 2014 y 2016 en donde los hongos entomopatógenos señalados con el nombre *I. fumosorosea*, *I. farinosa*, *H. thompsonii*, *H. citriformis*, *Nomourea rileyi* (*M. rileyi*) y *Lecanicillium lecanii* se encuentran listados como ingredientes activos u organismos de plaguicidas bioquímicos, microbianos, botánicos de riesgo reducido para la salud humana y ambiente. Los hongos *M. anisopliae* y *B. bassiana* no están listados, pero pertenecen a los plaguicidas microbianos y se clasifican y codifican conforme al uso ya sea agrícola, forestal, pecuario, jardinería, urbano, industrial o doméstico. De acuerdo con la Comisión Federal para la Pro-



tección contra Riesgos Sanitarios, existe un total de 45 productos (40 vigentes y 5 indeterminados) con Registros Sanitarios que contienen uno o más hongos entomopatógenos e indican una categoría de toxicología 4 (ligeramente tóxica) o categoría 5 (generalmente no tóxica) (COFEPRIS, 2024), como se muestra en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Registro sanitario de productos que contiene un hongo entomopatógeno (COFEPRIS, 2024)

Microorganismo	Registro sanitario	Nombre comercial	Toxicidad
<i>M. anisopliae</i>	RSCO-INAC-0903-0289-002-3.0	META-SIN/ META-PLUS / META-TRON / CONTROL-M / DEXTRUX / BIO ATTACK Ma	5
	RSCO-INAC-0376-0250-315-3.0	META-SIN	4
	RSCO-INAC-0903-X0460-002-0.72	BEGABT / ENTOBIOL / ENTOBIOL 7.2 / MAFDET/ MAFDET 7.2/ METARHIZIUM ANISOPLIAE 7.2 PH	5
	RSCO-INAC-0903-X0361-002-12.00	BIOMETT	5
	RSCO-INAC-0903-X0320-002-6.25	META-NOC/ METADOM/ MUSCARDINA/META HM10/ SUPERMETADOM/ SUPERMETA/ METAKILL 16/ META-LD 16	5
	RSCO-INAC-0190-0682-009-0.40	SPECTRUM META A/ METARHIZIUM/ ULTRALITE META A/ CYR METARHIZIUM/ CYR META/ SPECTRUM FUNGIZIUM/ INTER-M-A/ SPECTRUM MICOPROT/ SPECTRUM MICOLOW/ XRRIZUM	5
	RSCO-URB-INAC-0903-X0037-009-0.40	SPECTRUM META A / METARHIZIUM / ULTRALITE META A /CYR METARHIZIUM / CYR META / SPECTRUM FUNGIZIUM / SPECTRUM MICOPROT / SPECTRUM MICOLOW	5
<i>B. bassiana</i> CEPA GHA	RSCO-INAC-0195-311-355-011*	CERCON ES	4
	RSCO-INAC-0195-303-012-002*	NATURALIS L	4
	RSCO-INAC-0195-307-355-011*	MYCOTROL ES/ MYCOTROL ESO/ BOTEGHA	4
	RSCO-INAC-0195-305-355-011*	MYCOTROL ES / BOTANIGARD / MICRON / BAXIL	4
<i>B. bassiana</i>	RSCO-INAC-0195-0236-315-2.5	BEA-SIN	4
	RSCO-INAC-0903-0195-0291-002-2.5	BEA-SIN/ BEA-PLUS/ BEA-TRON/CONTROL-B /BEAUVER/ BIO ATTACK Bb	5
	RSCO-INAC-0195-315-002-007	ATENTO / BEIRA / BARA	5
	RSCO-INAC-0195-313-017-092	Bb-TECNICO	4
	RSCO-INAC-0195-X0301-417-20.0	BIOBEA / BASSIANOX / BEABIOL / MOSCACID® /MUMYS / BEALUX / BEACROP / MYCOVERIA / BEAUVER / BEAFIN	5
	RSCO-INAC-0195-X0359-002-12.00	BIOBASSB	5
	RSCO-INAC-0195-317-002-010	BIOVERIA/ BIOVETROL/ BIOVEGROW/ BASIMAX/ BIOVEGROP	5
	RSCO-INAC-0195-309-012-002*	NATURALIS L / MYCORALIS	4
	RSCO-INAC-0195-0622-002-1.4	MILINI / BIOIN DALIFE Bb / BROADBAND	5
	RSCO-INAC-0195-X0013-009-0.40	SPECTRUM BEA B / BEAUVERIA / ULTRALITE BEA B / CYR BEAUVERIA / INTER BB	5
RSCO-URB-INAC-0195-X0020-009-0.40	SPECTRUM BEA B / BEAUVERIA /ULTRALITE BEA B / CYR BEAUVERIA	5	
RSCO-INAC-0195-X0593-375-20.0	BIOBENA / BEAURIL / MPAWUCHI / BIO EXTREMT / BASSIPLUS / BEUBAS / BEPBea	5	
<i>V. lecanii</i>	RSCO-INAC-0104M-0237-315-2.5	VERTI-SIN	4
	RSCO-INAC-0104M-303-002-006	EDAY / FLORETE / VASTATOR	4
	RSCO-INAC-0104M-301-017-090	VL-TECNICO	4
<i>P. fumosoroseus</i>	RSCO-INAC-0907-0238-315-3.0	PAE SIN	4
	RSCO-INAC-0906-0286-002-3.0	PAE-SIN/ PAE-PLUS/ PAE-TRON/ CONTROL P/ PAECIOM/ BIO ATTACK Pf	5
	RSCO-INAC-0907-0409-002-20	PAECIL / BEMIS / FONGUSS/ PAECROP/ BIOCELIUM/ FUMBIOL / BIOMYTROL / ENTOFUM	5
	RSCO-INAC-0910-0014-034-020	PFR-97 20% WDG	5
	RSCO-INAC-1111-X0177-002-018	NOFLY WP / PACYLOS	5



<i>Isaria fumosorosea</i>	RSCO-INAC-0598-X0638-002-3.0	NOHOL / NOHOL 30 HP / BULLPEST / BULL PEST 30 HP / ISARIA FUMOSOROSEA 30 PH	5
	RSCO-INAC-0598-X0551-375-1.10	PF / FALCON	5
<i>Hirsutella thompsonii</i>	RSCO-INAC-0607-X0600-013-65.0	THOMPZAR / HIRSUTT / HIRSUZAR / BIOCONTROL HT / BIOENTO HT / ACARZAR / ENTOZAR / ENTOCAR / ACARCONTROL HT / BIOSONII	5
	RSCO-MEYC-INAC-0911H-X0089-375-30.0	AKARSTOP / AKARSTOP MIX / AKARSTOP PLUS / AKARKILL / AKARCONTROL / HN INSECT / ENTO STOP / ARACONTROL	5

*Registro sanitario con estatus indeterminado

Tabla 2. Registro Sanitario de productos que contiene dos o más hongos entomopatógenos (COFEPRIS, 2024)

Microorganismo	Registro sanitario	Nombre comercial	Toxicidad
	RSCO-MEYC-INAC-0903-0195-X0052-002-16.0	BIOMABB	5
<i>M. anisopliae</i> <i>B. bassiana</i>	RSCO-MEYC-INAC-0903-0195-X0050-0008-3.0	ANQUIM / MBgolf / METABASS / BM CONTROL	5
	RSCO-MEYC-INAC-0195-0903-X0077-002-20.0	ANQUIM SÓLIDO / BACPOL / ANTIFALL / METABEAU / BIOSTRIKE	5
<i>P. fumosoroseus</i> <i>M. anisopliae</i> <i>B. bassiana</i>	RSCO-INAC-0908-0285-002-5.7	TRI-SIN/ TRI PLUS/ TRI- TRON/ CONTROL-TRI/ ENTOMOTRI/ BIO ATTACK Mix3	5
	RSCO-INAC-0909-0290-009-5.7	TRI-SIN/ TRI-PLUS/ TRI-TRON/ CONTROL-TRI / ENTOMOTRI / BIO ATTACKMix3	5
<i>B. bassiana</i> <i>M. anisopliae</i> <i>L. lecanii</i>	RSCO-MEYC-INAC-0910M-X0064-375-45.00	ZABIYAK 3X	5
<i>B. bassiana</i> <i>M. anisopliae</i> <i>L. lecanii</i> <i>B. thuringiensis</i>	RSCO-MEYC-INAC-0911Z-X0118-375-20.5	FOGONERO / BIOPLAGUIDE / EKSTERMINANTO	5
<i>B. bassiana</i> <i>Bacillus thuringiensis</i>	RSCO-MEYC-INAC-0195-0105-X0178-052-40	BIOHAMMER M/ BIOPEST MAX/ ZEROBOOM / BIOANTIPLAGA/ BIOPESTMAX	5
<i>B. bassiana</i> <i>N. rileyi</i> <i>M. anisopliae</i> <i>V. lecanii</i> <i>P. fumosoroseus</i>	RSCO-MEYC-INAC-0195-X0029-096-85.0	ENTOMAXX 5X2 / BIOMAXX DUO / ENTOPLUS BIO / MAXXI-KOVER BIO. / BIOFIVE STARS / BIOPEST PAE / BIOPEST BEA / BIOPEST FUMOS / BIOPEST MET BEA / BIOPEST VERTILEC / BIOPEST META	5
<i>B. bassiana</i> <i>N. rileyi</i> <i>Bt var. kurstaki</i> <i>Bt.var. israelensis</i>	RSCO-INAC-0195-0636-096-54	LARBIOL 2X / BIOHAMMER / LARVIOUT / KILLARV / LARBIOL GM / LEPIDOUT / ENTOMAXX 5X2 / BIOPESTMAX	5

Conclusiones

Los micoinsecticidas son candidatos en ascenso en el control biológico debido a la gran cantidad de insectos plagas que pueden combatir y por su eficiente mecanismo de infección por contacto. En México existen al menos 45 micoinsecticidas regulados y disponibles para beneficiar a la agricultura sostenible; no obstante, este uso está limitado principalmente por la decisión del agricultor y por la desinformación, por lo que es importante concientizar a la sociedad del beneficio de su uso.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.



Referencias

- Alatorre-Rosas, R., & Tamayo-Mejía, F. (2020). Protozoarios-microsporidia y hongos entomopatógenos. En Arredondo-Bernal, H. C., Tamayo-Mejía, F., & Rodríguez del Bosque, L.A. (Eds). *Fundamento y Práctica del Control Biológico de Plagas y Enfermedades* (pp. 187-238). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Alatorre-Rosas, R., & Hernández-Rosas, F. (2015). Mosca pinta, *Aeneolamia* spp. y *Prosapia* spp. (Hemiptera: Cercopidae). En Arredondo-Bernal, H. C., & L. A. Rodríguez-del-Bosque (Eds.), *Casos de Control Biológico en México, Vol. 2* (pp.141-164) Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduado.
- Arredondo-Bernal, H. C., & Rodríguez-González, B. (2020). Biological Control in Mexico. En van Lenteren, J., V. H. P. Bueno, M.G. Luna & J.C. Colmenares (Eds.), *Biological Control in Latin America and the Caribbean: Its Rich History and Bright Future* (pp. 308-335). CAB International Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781789242430.0001>
- Badii, M. H., Flores, A. E., Torres, R., & Quiroz, H. (1994). Medición del impacto económico de las plagas. *Calidad Ambiental*, 1(6), 6-9.
- Barrera, J. F. (2020). Conceptos, alcances e implicaciones del control biológico. En Arredondo-Bernal, H. C., Tamayo-Mejía, F., & Rodríguez del Bosque, L. A. (Eds), *Fundamento y Práctica del Control Biológico de Plagas y Enfermedades* (pp. 15-39). Biblioteca Básica de Agricultura, México
- Barrera, J. F., Gómez, J., Castillo, A., López, E., Herrera, J., & González, G. (2008). Broca del café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). En Arredondo-Bernal, H. C., & L. A. Rodríguez-del-Bosque (Eds.), *Casos de Control Biológico en México* (pp. 101-120). Mundi-Prensa, México.
- Behie, S. W., Jones, S. J., & Bidochka, M. J. (2015). Plant tissue localization of the endophytic insect pathogenic fungi *Metarhizium* and *Beauveria*. *Fungal Ecology*, 13, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2014.08.001>
- Brunner-Mendoza, C., Moonjely, S., Reyes-Montes, M. R., Toriello, C., & Bidochka M. J. (2017). Physiological and phylogenetic variability of Mexican *Metarhizium* strains. *BioControl*, 62, 779-791. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9839-3>
- Butt, T. M., Coates, C. J., Dubovskiy, I. M., & Ratcliffe N. A. (2016). Entomopathogenic Fungi: New Insights into Host-Pathogen Interactions. *Advanced Genetics*, 94, 307-64. <https://doi.org/10.1016/bs.adgen.2016.01.006>
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (25 de febrero 2024). *Consulta de Registros Sanitarios de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y LMR*. <https://siipris03.cofepris.gob.mx/Resoluciones/Consultas/ConWebRegPlaguicida.asp>
- De Bach., P. (1964). *Biological control of insect's pests and weeds*. Cambridge University Press.
- Enríquez-Vara, J. N. (2021). Control biológico de plagas con microorganismos entomopatógenos. En Castañeda-Nava, J.J. (Eds), *Tópicos de Herramientas Biotecnoló-*



- gicas para el Desarrollo Agrícola* (pp. 73-80). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C.
- Hernández-Rosas, F. & Figueroa-Rodríguez, K. A. (2011). Barrenador (*Diatraea Saccharalis*) y mosca pinta (*Aeneolamia* spp. *Prosapia* spp.) en caña de azúcar y sus enemigos naturales. *Agro Productividad*, 4(3). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/578>
- Hernández-Rosas, F. (2009). *Manejo del salivazo (Aeneolamia postica) mediante inducción de epizootias con Metarhizium anisopliae*. XXXII Convención de la Asociación de Técnicos Azucareros México A.C. Córdoba, Veracruz, México.
- Hernández-Velázquez, V. M., Hunter, D. M., Barrientos-Lozano, L., Lezama-Gutiérrez, R. & Reyes-Villanueva, F. (2003). Susceptibility of *Schistocerca piceifrons* (Orthoptera: Acrididae) to *Metarhizium anisopliae* var. *acridum* (Deuteromycotina: Hyphomycetes): laboratory and field trials. *Journal of Orthoptera Research*, 12(1), 89-92. [https://doi.org/10.1665/1082-6467\(2003\)012\[0089:SOSPOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1665/1082-6467(2003)012[0089:SOSPOA]2.0.CO;2)
- Hernández-Velázquez, V.M. & Toriello, C. (2008). Langosta voladora, *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Orthoptera: Acrididae). En H.C Arredondo-Bernal, & L. A. Rodríguez-del-Bosque (Eds.), *Casos de Control Biológico en México* (pp.47-75). Mundi-Prensa, México.
- Montesinos-Matías, R., Ayala-Zermeño, M. A., Berlanga-Padilla A. M., Avalos, A. J. J., & Arredondo-Bernal, H. C. (2020). Colección de Hongos Entomopatógenos del Centro Nacional de Referencia de Control Biológico, México. *Boletín de la Federación Latinoamericana de Colecciones de Cultivos (FELACC)*, 29, 6-13. <http://felacc.cinvestav.mx/boletin/29.pdf>
- Murillo Alonso, K. T., Salazar Magallón J. A., Olarte Lozano M., Peña Chora, G., Hernández Baltazar E., Toriello C., & Hernández Velázquez, V. M. (2023). Evaluation of *Isaria javanica* (Hypocreales: Cordycipitaceae) oil dispersion formulations for the control of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 43, 2179-2187. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01120-5>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2015). *Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles: Principios y enfoques*. <https://www.fao.org/3/i3940es/i3940es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2019). *Manejo integrado de plagas y plaguicidas*. <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/ipm/integrated-pest-management/es/>
- Pretty J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science (New York, N.Y.)*, 362(6417), eaav0294. <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>



- Rodríguez-Rodríguez, J. C., Montesinos-Matías, R., Berlanga-Padilla, A. M., Ayala-Zermeño, M. A. & Arredondo-Bernal H. C. (2017). Colección de Hongos Entomopatógenos del Centro Nacional de Referencia de Control Biológico, México. *Boletín de la Federación Latinoamericana de Colecciones de Cultivos (FE-LACC)*, 23: 5-10. https://www.researchgate.net/publication/319725078_Coleccion_de_hongos_entomopatogenos_del_Centro_Nacional_de_Referencia_de_Control_Biologico_Mexico
- Sánchez-González, J. A., Mellín-Rosas, M. A., Arredondo-Bernal, H. C., Vizcarra Valdez, N. I. González-Hernández, A., & Montesinos-Matías, R. (2015). Psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). En Arredondo-Bernal, H.C. y L.A. Rodríguez-del-Bosque (Eds.), *Casos de Control Biológico en México, Vol. 2.* (pp. 339-372). Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduado.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., Mc Roberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural – Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2019). *Manual para el buen uso y manejo de plaguicidas en campo.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/452645/MANUAL_PARA_EL_BUEN_USO_Y_MANEJO_DE_PLAGUICIDAS_EN_CAMPO.pdf
- Secretaría de Gobernación. (13 de febrero 2014). *DECRETO por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones del Reglamento en Materia de Registros, Autorizaciones de Importación y Exportación y Certificados de Exportación de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Sustancias y Materiales Tóxicos o Peligrosos.* Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5332473&fecha=13/02/2014
- Secretaría de Gobernación - Secretaría de Salud. (22 de noviembre 2016). *ACUERDO por el que se da a conocer la Lista de plaguicidas bioquímicos, microbianos, botánicos y misceláneos de riesgo reducido.* Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5461755&fecha=22/11/2016
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2009). *Ficha Técnica Schistocerca piceifrons piceifrons Walker, Langosta Centroamericana.* Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157817/Ficha_tcnica_langosta.pdf
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2024). *Entomopathogenic Fungi Collection (CHE).* Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/802042/Entomopathogenic_Fungi_Collection__CHE_.pdf
- Tanada, Y., & Kaya, H. K. (1993). *Insect pathology.* Academic Press.



Evaluación de la capacidad promotora del crecimiento vegetal y actividad antagonista contra hongos fitopatógenos de las bacterias *Streptomyces*

Fabiola Islas-Lugo¹, Valeria Gutiérrez-García², Andrés Cruz-Arredondo², Diana E. Ríos-Muñiz¹ y Zahaed Evangelista-Martínez^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Subsele Sureste.

²Universidad Anáhuac Mayab.

*Autor de correspondencia: zevangelista@ciatej.mx

Palabras clave:

actinobacterias, antagonismo, bioinsumos, control biológico, hongos fitopatógenos

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
137-148. ISSN: 3061-709X.
[https://doi.org/10.5281/
zenodo.12766054](https://doi.org/10.5281/zenodo.12766054)

Recibido: 13 abril 2024
Revisado: 20 de mayo 2024
Aceptado: 02 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

Las bacterias *Streptomyces* son microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica acumulada en el suelo y transformarla en compuestos asimilables por las plantas. Son bacterias que controlan microorganismos fitopatógenos y participan como promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). El objetivo fue evaluar en cepas de *Streptomyces* la capacidad PGPR y antagonista de hongos fitopatógenos. A 10 cepas se les determinó la actividad de solubilización de fosfatos, producción de sideróforos y capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Se observó que todas fijaron nitrógeno, 5/10 cepas solubilizaron fosfatos y 9/10 produjeron sideróforos. En cuanto al antagonismo, 4/10 cepas inhibieron el crecimiento de *Fusarium oxysporum* destacando la cepa B153. La cepa B153 mostró más altos porcentajes de inhibición (estadísticamente significativos) contra diversos hongos fitopatógenos respecto a la cepa comercial *S. lydicus* WYEC108. *Streptomyces* sp B153 se puede considerar como una cepa con potencial capacidad de promover el crecimiento vegetal y controlar el desarrollo de hongos fitopatógenos.

Introducción

Los bioinsumos microbianos son todos aquellos productos que contienen microorganismos benéficos que desempeñan un importante papel en la producción de alimentos de origen vegetal, libres de compuestos tóxicos contenidos en los agroinsumos de origen



químico sintético. Entre las funciones principales que los bioinsumos realizan están las relacionadas a mejorar la fertilidad del suelo, mantener una buena productividad agrícola usando menos productos químicos, contribuir en evitar el uso de pesticidas químicos y su dispersión al ambiente y proporcionar mejoras sustanciales en la inocuidad de los alimentos de origen agrícola (Nosheen, Ajmal, & Song, 2021). El efecto benéfico de los bioinsumos en el suelo se ve reflejado por la presencia de una mayor cantidad de nutrientes asimilables por las plantas y menor presencia de microorganismos patógenos que les causan enfermedades. Los microorganismos que forman parte de los bioinsumos contribuyen en el crecimiento vegetal y su productividad realizando diversas actividades de manera directa o indirecta, entre las que destacan: fijación biológica de nitrógeno en vida libre o en simbiosis, solubilización de fosfato, producción de fitohormonas, supresión de enfermedades por medio de agentes de control biológico, disminución del estrés abiótico y biorremediación de contaminantes (Glick & Gamalero, 2021; Santoyo *et al.*, 2021; Sehrawat, Sindhu, & Glick, 2022; Kumar *et al.*, 2022)

A nivel mundial, la producción agrícola en los campos de cultivo es afectada por la presencia de hongos y omicetos patógenos, los cuales causan pérdidas en la productividad de alrededor el 70 al 80%, además de que se ve drásticamente reducida la calidad e inocuidad de los productos hortofrutícolas (Yang, Shuai-Wen & Kun-Tai, 2019). Los hongos son un grupo diverso de microorganismos que cumplen funciones biológicas y ecológicas muy importantes; sin embargo, poco más de 8 000 especies son patógenos de plantas (Shuping & Eloff, 2017). Esta diversidad de hongos fitopatógenos provoca afectaciones sobre las raíces, tallos, hojas, flores, frutos y semillas. Algunas de las especies más importantes son *Botrytis cinerea* o moho gris, que causa daño en un amplio rango de especies vegetales, incluyendo muchas especies que producen granos (De Angelis *et al.*, 2022). La antracnosis es una enfermedad provocada por muchas especies del género *Colletotrichum*, que afectan flores, hojas y frutos provocando severos daños en los cultivos, principalmente frutales. *C. gloeosporioides* es considerada la principal especie patógena que afecta frutos como mango y papaya en la etapa postcosecha, aunque se ha reportado que *C. siamense* y *C. asianum* han causado daños severos en mango (Kamle *et al.*, 2013; Tovar-Pedraza *et al.*, 2020). Por otra parte, existen hongos, entre los que se puede señalar a *Fusarium oxysporum*, que causan daños severos a nivel del sistema radicular de la planta. En particular, este patógeno afecta una gran variedad de cultivos provocando marchitamiento en las plantas y su muerte (Dean *et al.*, 2012). Finalmente, otro de los hongos importantes es *Lasiodiplodia theobromae*, que es una especie que provoca la llamada muerte descendente y pudrición del pedúnculo en frutos de mango, papaya, aguacate, entre otros (Picos-Muñoz *et al.*, 2015).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar en diferentes cepas de *Streptomyces* la potencial capacidad de actuar como PGPR y antagonizar el crecimiento de hongos fitopatógenos.



Materiales y métodos

Microorganismos empleados en el estudio

Las cepas de *Streptomyces* empleadas en el estudio se encuentran conservadas en el Banco de Germoplasma de Actinomicetos en la Subsección Sureste del CIATEJ. Todas ellas se aislaron de muestras de suelos rizosféricos obtenidas de localidades ubicadas en los estados de Campeche, Chiapas, Hidalgo y Yucatán. La cepa comercial *S. lydicus* WYEC108 se usó en los experimentos de antagonismo como control positivo.

Los hongos fitopatógenos utilizados fueron cultivos monospóricos de *F. oxysporum*, *F. oxysporum* f. sp. lycopersici, *F. oxysporum* f. sp. gladioli, *B. cinerea*, *Aspergillus* sp., *L. theobromae* y *C. siamense* (Evangelista-Martínez *et al.*, 2022).

Actividad antagonista

La búsqueda inicial de estreptomicetos antagonistas sobre el crecimiento de los hongos fitopatógenos se realizó mediante experimentos de confrontación dual en placas Petri con medio de crecimiento ISP No. 2, empleando a *Fusarium oxysporum* f. sp. gladioli (Bredholdt *et al.*, 2007; Rios-Hernández, Uc-Vázquez, & Evangelista-Martínez, 2021). Para ello, se depositaron 3 µl de la SE (suspensión de esporas) de cada cepa hacia un lado de la placa Petri, aproximadamente 0.5 cm del borde, y en el lado opuesto 3 µl de la SE de *S. lydicus* WYEC108. Después de 20 min, se depositó al centro de cada placa Petri un disco de agar de 9 mm de diámetro cubierto con micelio activo de los hongos fitopatógenos. Un disco de agar cubierto con micelio activo de los hongos depositado al centro de una placa Petri sin los estreptomicetos se usó como control del crecimiento. Las cepas se consideraron antagonistas cuando se observó que el crecimiento del micelio del hongo en dirección al estreptomiceto se detuvo y quedó separado del borde de la colonia. El efecto se determinó como (-), sin antagonismo; (+) actividad antagónica baja; (++) actividad antagónica media; (+++), actividad antagónica alta. Se realizaron tres repeticiones por cada cepa evaluada.

Experimentos posteriores para evaluar el Porcentaje de inhibición (PI) de las cepas seleccionadas sobre otros hongos fitopatógenos se realizaron tal como se describió previamente. El experimento concluyó cuando el crecimiento micelial del hongo en el control alcanzó el borde de la placa Petri, momento en el cual se registró el crecimiento del hongo con un vernier. El porcentaje de inhibición (PI) se determinó con la fórmula: $PI (\%) = (CH - CE) / CH \times 100$, en donde CH representa el crecimiento radial del hongo (mm) de la placa control, y CE, representa el crecimiento radial del hongo (mm) en la dirección de la bacteria antagonista (Evangelista-Martínez *et al.*, 2020). El experimento consistió de tres replicas por cada hongo evaluado.



Evaluación de las propiedades promotoras de crecimiento vegetal

a) Solubilización de fosfatos

La determinación cualitativa de la solubilización de fosfatos se llevó a cabo en el agar NBRIP (Nautiyal, 1999). Se depositaron 3 μ l de la SE de las cepas aisladas a una placa Petri con el medio, se dejaron secar y enseguida se colocaron en una incubadora mantenida a 37 °C durante 10 días hasta la aparición de halos claros alrededor de las colonias. Los aislados que presentaron halos claros se seleccionaron y enseguida se repitió el proceso previamente descrito. Posterior al tiempo de incubación, se midió con un vernier el diámetro de las colonias y del halo claro a su alrededor. La eficiencia de solubilización de fosfatos se determinó como: Índice de solubilización de fosfatos (ISF) = Diámetro Total (DT, colonia + halo) / Diámetro de la Colonia (DC) (Tariq *et al.*, 2022).

b) Producción de sideróforos

La detección de sideróforos producidos por los estreptomicetos seleccionados se realizó empleando medio agar azul CAS (Cromo azurol S) (Louden *et al.*, 2011). Inicialmente, se inocularon cajas de ISP 2 con las distintas cepas dejándolas crecer a 29 °C por 12 días; de cada placa Petri se obtuvo un disco de agar de 9 mm de diámetro que se colocó sobre las placas Petri con el medio CAS. Las placas se mantuvieron a 29 °C por 10 días. La aparición de halos amarillos a translucidos alrededor de los discos de agar se consideró evidencia de la producción de sideróforos. El Índice de producción de sideróforos (ISid) se determinó como: ISid) = Diámetro Total (DT, disco de agar + halo claro) / Diámetro del disco de agar (DDA). Los experimentos se realizaron por duplicado.

c) Fijación biológica de nitrógeno

El experimento para determinar que las cepas realizan fijación biológica de nitrógeno consistió en inocular 3 μ l de la SE de las cepas aisladas a una placa Petri con el medio Ashby, medio de cultivo libre de nitrógeno (Roy, 1958). Las placas se mantuvieron a 29 °C por 10 días. Las colonias que lograron crecer en el medio de cultivo fueron consideradas como capaces de crecer en un medio sin nitrógeno.

d) Análisis estadístico

El porcentaje de inhibición se expresó como la media \pm la desviación estándar. Las medias se compararon mediante una prueba de Análisis de Varianza de dos vías seguido por la prueba de Tukey (P = 0.05), usando el software MiniTab v18 (Minitab, LLC).



Resultados y Discusión

Selección preliminar de los estreptomicetos con actividad antagonista

La selección de las cepas de *Streptomyces* con actividad antagonista contra hongos fitopatógenos se evaluó de manera cualitativa sólo contra *F. oxysporum* f. sp. gladioli (Foxy), una especie patógena muy virulenta que causa la pudrición de los cormos de gladiolo (Rios-Hernández *et al.*, 2021). De las 10 cepas evaluadas cualitativamente, en cuatro se observó actividad inhibitoria del crecimiento de Foxy, de las cuales dos mostraron actividad antagónica baja (CHS20 y CACIA-3.39HGO, +), una cepa con actividad media (G1512, ++) y una con actividad alta (G153, +++) (Tabla 1). A estas cuatro especies se les realizaron experimentos de antagonismo adicionales con la finalidad de determinar su potencial como agentes de control biológico contra diversos hongos fitopatógenos.

Actividad preliminar de PGPR en *Streptomyces* spp

La exploración de la actividad *in vitro* de PGPR de los estreptomicetos se evaluó para las 10 cepas. Todas las cepas fueron capaces de crecer en el medio de crecimiento Ashby que carece de fuente de nitrógeno; sin embargo, algunas cepas se diferenciaron de otras porque mostraron un crecimiento de la colonia más robusto y vigoroso, tal como las cepas CACIA-1.7HGO, CACIA-1.33HGO y CACIA-3.39HGO. Respecto al índice de solubilización de fosfatos (ISF) en el medio NBRIP, cinco de las cepas mostraron actividad de solubilización, siendo la cepa CHS20 la que mostró un halo traslucido alrededor de la colonia y con el índice más elevado (1.88 ± 0.16). Respecto a la producción de sideróforos, se observó en 9 de las 10 cepas evaluadas la presencia de un halo claro alrededor del disco de agar colocado en el medio CAS, con valores del ISid que fluctuaron entre 1.43 a 2.04 (Tabla 1 y Figura 1).

De las cepas evaluadas, CHS-20 y CACIA-1.7HGO parecen ser las mejores especies que *in vitro* presentan actividad de PGPR, tomando en cuenta que ambas fijan el nitrógeno atmosférico, ambas solubilizan PO_4 , aunque CHS-20 es la que mejor lo solubiliza y CACIA-1.7HGO es la que muestra una mejor producción de sideróforos (Tabla 1).

Tabla 1. Actividad promotora del crecimiento de las plantas (PGPR) *in vitro* de *Streptomyces* spp.

<i>Streptomyces</i> sp Cepa	Antagonismo vs Foxy	Fijación N_2 at- mosférico	Solubilización de PO_4 (ISF)	Sideróforos (ISid)
CACIA-1.7HGO	-	+++	1.21 ± 0.14	2.04 ± 0.20
CACIA-1.33HGO	-	+++	1.26 ± 0.02	1.63 ± 0.16
CACIA-3.39HGO	+	+++	1.16 ± 0.02	ND
ACTINO Y36	-	++	ND	1.47 ± 0.07
CHS-20	+	++	1.88 ± 0.16	1.84 ± 0.07



G153	+++	+	1.38 ± 0.12	1.76 ± 0.05
G155	-	++	ND	2.02 ± 0.27
G158	-	++	ND	1.43 ± 0
G1510	-	+	ND	1.57 ± 0.20
G1512	++	+	ND	1.84 ± 0.30

Antagonismo: Foxy, *F. oxysporum* f. sp. *gladioli*; (-), sin antagonismo; (+), antagonismo bajo; (++) , antagonismo moderado; (+++) , antagonismo alto. Fijación de N₂: (+), poco crecimiento de la colonia; (++) , crecimiento moderado de la colonia; (+++) , crecimiento robusto de la colonia. ND, actividad no detectada.

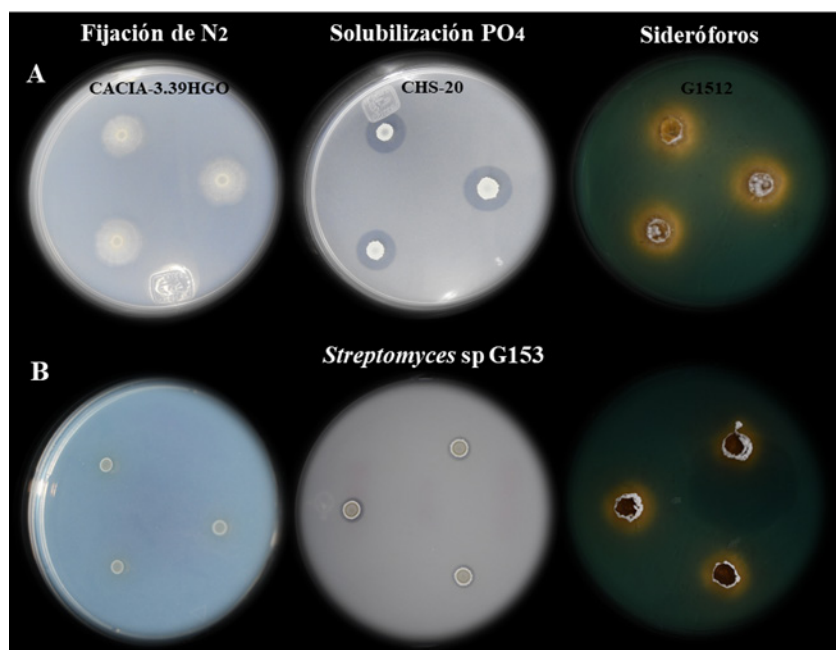


Figura 1. Actividad PGPR de diferentes especies de *Streptomyces* spp. A) Cepas de *Streptomyces* con las mejores actividades de fijación de N₂ (CACIS-3.39HGO), solubilización de fosfatos (CHS-20) y producción de sideróforos (G1512). B) Actividad PGPR *in vitro* de *Streptomyces* sp G153

Se conoce que un buen número de especies de *Streptomyces* participan en promover el crecimiento vegetal, en el control biológico de plagas y microorganismos fitopatógenos a través de la producción de fitohormonas, sideróforos, enzimas extracelulares, compuestos volátiles, compuestos antimicrobianos, entre otros. Además, participan en incrementar la biodisponibilidad de los nutrientes del suelo y disminuir los efectos abióticos negativos (salinidad, sequía, contaminantes) que afectan a las plantas (Nazari *et al.*, 2023). Tal es el caso de la especie *Streptomyces cirratus* (ST3E), la cual indujo un aumento del tamaño del vástago y peso seco de plantas de ajo, mientras que con otras cepas como *Streptomyces* sp (ST2A) se observó un aumento del tamaño de la raíz, y con las cepas *Streptomyces* sp (ST8A) y *Streptomyces* sp (ST8B) se logró un aumento en el diámetro del bulbo del ajo (Condori-Pacsi, Fernández-Guzman, & Valderrama-Valencia, 2019).



Actividad antagonista *in vitro* de *Streptomyces* sp G153 contra diversos hongos fitopatógenos

Con las cuatro cepas que mostraron actividad antagonista cualitativa contra *F. oxysporum* f. sp. gladioli se realizó un experimento de antagonismo contra diversos hongos fitopatógenos y los resultados se muestran en la Tabla 2. Se observa que la cepa G153 fue la que inhibió el crecimiento de las siete especies de hongos fitopatógenos, en comparación con las otras tres cepas de estreptomicetos, con PI mayores al 80%, le siguió la cepa G1512 inhibiendo el crecimiento de cinco especies, *S. lydicus* WYEC108 (cuatro especies) y posteriormente CACIA-3.39HGO y CHS20, mostrando antagonismo contra dos y una especie de hongo, respectivamente. De manera general, tomando en cuenta los PI observados con todos los hongos, se observaron diferencias estadísticas entre las cepas de *Streptomyces* ($P < 0.05$, letras en mayúsculas). La cepa G153 mostró una amplia actividad inhibitoria contra los hongos fitopatógenos evaluados que se diferencia del resto por contar con valores de PI mayores a los de la cepa comercial *S. lydicus* WYEC108 (Tabla 2 y Figura 2). Inclusive la cepa G1512 superó a la especie comercial usada como control.

Respecto a los hongos fitopatógenos más susceptibles a la inhibición por las cepas de *Streptomyces*, se observó que *Aspergillus* sp resultó el más susceptible (4/5 cepas), seguido de *F. oxysporum* f. sp. gladioli, *B. cinerea* y *C. siamense* (3/5 cepas).

Tabla 2. Porcentaje de inhibición (PI) de las cepas de *Streptomyces* seleccionadas contra diversos hongos fitopatógenos

Hongo	<i>Streptomyces</i> sp CACIA-3.39HGO ^c	<i>Streptomyces</i> sp CHS-20 ^c	<i>Streptomyces</i> sp G153 ^a	<i>Streptomyces</i> sp G1512 ^b	<i>S. lydicus</i> WYEC108 ^b
I	4.02 ± 2.2 °	3.13 ± 2.0 °	80.11 ± 0.6 ^a	68.40 ± 1.3 ^b	1.87 ± 0.6 °
II	1.23 ± 0.7 °	2.81 ± 0.2 °	86.09 ± 2.1 ^a	68.62 ± 2.5 ^b	5.89 ± 1.7 °
III	1.58 ± 0.6 °	2.98 ± 0.8 °	84.65 ± 0.3 ^a	70.46 ± 1.8 ^{ab}	65.64 ± 0.5 ^b
IV	53.98 ± 2.6 °	3.37 ± 1.6 ^d	95.35 ± 0.8 ^a	2.35 ± 1.4 ^d	74.54 ± 2.9 ^{bb}
V	16.05 ± 2.9 °	39.45 ± 1.8 ^b	87.09 ± 4.8 ^a	83.39 ± 1.9 ^a	45.95 ± 2.1 ^b
VI	53.98 ± 1.2 °	3.37 ± 0.3 ^d	95.35 ± 0.6 ^a	2.35 ± 2.2 ^d	74.54 ± 1.5 ^b
VII	2.97 ± 1.6 °	4.82 ± 2.5 °	89.74 ± 1.4 ^a	71.37 ± 5.2 ^b	3.95 ± 0.7 °

I-*Fusarium oxysporum*; II- *F. oxysporum* f. sp. lycopersici; III-*F. oxysporum* f. sp. gladioli; IV-*Botrytis cinerea*; V-*Aspergillus* sp.; VI-*Lasiodiplodia theobromae*; VII-*Colletotrichum siamense*. *Las medias con letras diferentes difieren significativamente ($P = 0.05$).

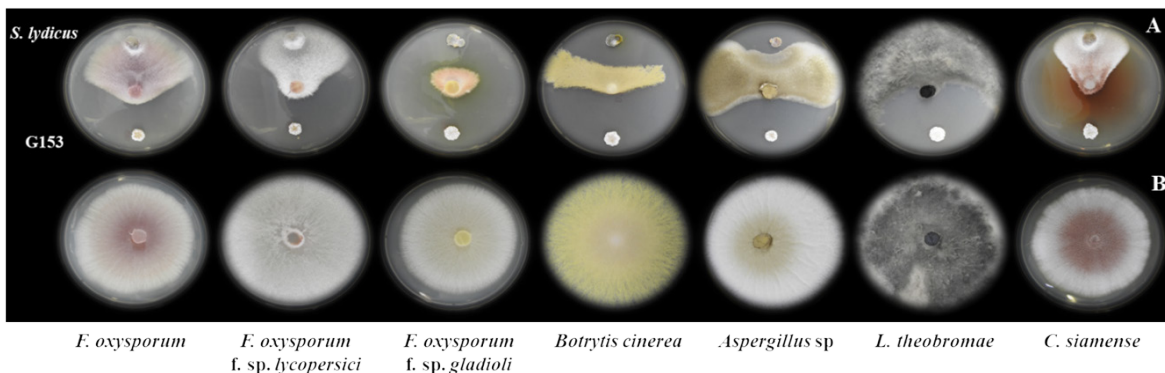


Figura 2. Actividad antagonista *in vitro* de *Streptomyces* sp B153 contra diversos hongos fitopatógenos. A) Antagonismo por medio de confrontación dual en placas Petri de la cepa B153 en comparación con *S. lydicus* WYEC108. B) Control de crecimiento de los hongos evaluados

Algunas cepas de *Streptomyces* sp. (CACIS-1.5CA y CACIS-2.15CA) han mostrado actividad antagonista contra hongos fitopatógenos de las especies *C. musae*, *C. siamense*, *B. cinerea*, *L. theobromae*, *Aspergillus* sp., *Alternaria* sp. que causan pudriciones en frutos, así como en contra de especies de hongos de los géneros *Fusarium*, *Rhizoctonia* y *Phytophthora*, que causan daño en otros tejidos vegetales como en raíz (Evangelista-Martínez *et al.*, 2020; Rios-Muñiz & Evangelista-Martínez, 2022).

Las bacterias del género *Streptomyces* se caracterizan por estar distribuidas en todos los ambientes, tanto terrestres como acuáticos. Este grupo de bacterias Gram positivas se caracterizan por desarrollar un micelio filamentoso, formar esporas y producir una gran variedad de metabolitos secundarios con actividades diversas, destacando las actividades antibacterianas, antifúngicas, antitumorales, citotóxicas, entre otras (Law *et al.*, 2017; Qi *et al.*, 2019). En los suelos desempeñan un papel muy importante en la degradación de la materia orgánica a través del amplio repertorio de enzimas extracelulares que excreta, entre las que se pueden nombrar a proteasas, celulasas, xilanasas, quitinasas, lipasas, entre otras más (Kumar *et al.*, 2020).

Conclusiones

El uso de las bacterias del género *Streptomyces* en la agricultura es una alternativa prometedora para poder reducir la demanda de los agroquímicos tomando en consideración el potencial que tienen estas bacterias para ser empleadas en actividades de promoción de crecimiento vegetal y en el control de organismos fitopatógenos.

La cepa *Streptomyces* sp G153 mostró los mejores PI contra todos los hongos fitopatógenos, además de mostrar actividades *in vitro* relacionadas a la promoción de crecimiento vegetal, un poco limitadas. Por lo que resulta importante avanzar en el desarrollo de una formulación de un bioinsumo agrícola que pueda ser evaluada en invernadero y campo.



Conflicto de interes

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

El trabajo fue financiado con los proyectos CONACYT-PN-2016-2900 y Proyecto CF-2022-320612: Paradigmas y controversias de la Ciencia.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por otorgar el financiamiento de las becas de estudios de posdoctorado de la Dra. Diana E. Rios-Muñiz (CVU 391737) y de la Dra. Fabiola Islas Lugo (CVU 172926).

Referencias

- Bredholdt, H., Galatenko, O. A., Engelhardt, K., Fjaervik, E., Terekhova, L. P. & Zotchev, S. B. (2007). Rare actinomycete bacteria from the shallow water sediments of the Trondheim fjord, Norway: isolation, diversity, and biological activity. *Environmental Microbiology*, 9, 2756–2764. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01387.x>
- Condori-Pacsi, S. J., Fernández-Guzman, P. R., & Valderrama-Valencia, M. R. (2019). Aislamiento y caracterización de *Streptomyces* spp rizosféricos promotores del crecimiento vegetal. *Idesia (Arica)*, 37(2), 109-116. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000200109>
- De Angelis, G., Simonetti, G., Chronopoulou, L., Orekhova, A., Badiali, C., Petrucci, V., Portoghesi, F., D'Angeli, S., Brasili, E., Pasqua, G., & Palocci, C. (2022). A novel approach to control *Botrytis cinerea* fungal infections: uptake and biological activity of antifungals encapsulated in nanoparticle based vectors. *Scientific reports*, 12(1), 7989. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11533-w>
- Dean, R., Van Kan, J.A., Pretorius, Z.A., Hammond-Kosack, K.E., Di Pietro, A., Spanu P.D., Rudd, J.J., Dickman, M., Kahmann, R., Ellis, J., Foster, G.D. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 13(4), 414–430. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>
- Evangelista-Martínez, Z., Contreras-Leal, E.A., Corona-Pedraza, L.F., & Gastélum-Martínez, E. (2020). Biocontrol potential of *Streptomyces* sp. CA-CIS-1.5CA against phytopathogenic fungi causing postharvest fruit diseases. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30, 117. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00319-9>



- Evangelista-Martínez, Z., Ek-Cen, A., Torres-Calzada, C., Uc-Vázquez, A. (2022). Potential of *Streptomyces* sp. strain AGS-58 in controlling anthracnose causing *Colletotrichum siamense* from post-harvest mango fruits. *Journal of Plant Pathology*, 104(2), 553–563. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01104-3>.
- Glick, B.R., Gamalaro, E., (2021). Recent developments in the study of plant microbiomes. *Microorganisms*, 9(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071533>.
- Kamle, M., Kumar, P., Gupta, V. K., Tiwari, A. K., Misra, A. K., Pandey, B. K. (2013). Identification and phylogenetic correlation among *Colletotrichum gloeosporioides* pathogen of anthracnose for mango. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2(3), 285-287, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.04.001>.
- Kumar, M., Kumar, P., Das, P. Renu Solanki, Monisha Khanna Kapur1. (2020). Potential applications of extracellular enzymes from *Streptomyces* spp. in various industries. *Archives of Microbiology*, 202, 1597–1615. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01898-9>
- Kumar, S., Diksha, Sindhu, S. S., & Kumar, R. (2022). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100094, <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100094>
- Law J.W., Ser, H.L., Khan, T.M., Chuah, L.H., Pusparajah, P., Chan, K.G., Goh, B.H., Lee, L.H. (2017). The potential of *Streptomyces* as biocontrol agents against the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae* (*Pyricularia oryzae*). *Frontiers in Microbiology*, 8, 3. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00003>
- Louden, B.C., Haarmann, D., Lynne, A.M. (2011). Use of Blue Agar CAS Assay for Siderophore Detection. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 12(1), 51-53. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v12i1.249>
- Nautiyal, C.S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170(1), 265-270. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x>
- Nazari, M.T., Schommer, V.A., Braun, J.C.A., dos Santos, L.F., Lopes, S.T., Simon, V. Machado, B.S., Ferrari, V., Colla, L.M., & Piccin, J.S. (2023). Using *Streptomyces* spp. as plant growth promoters and biocontrol agents. *Rhizosphere*, 27, 100741. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100741>
- Nosheen, S., Ajmal, I., & Song, Y. (2021). Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production. *Sustainability*, 13(4),1868. <https://doi.org/10.3390/su13041868>
- Picos-Munoz, P.A, García-Estrada, R.S., Leon-Felix, J., Sanudo-Barajas, A., Allende-Molar, R. (2015). *Lasiodiplodia theobromae* in agricultural crops in Mexi-

- co: taxonomy, host, diversity and control. *Revista mexicana de fitopatología*, 33(1), 54-74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092015000100054&lng=es&tlng=en.
- Qi, D., Zou, L., Zhou, D., Chen, Y., Gao, Z., Feng, R., Zhang, M., Li, K., Xie, J., & Wang, W. (2019). Taxonomy and broad-spectrum antifungal activity of *Streptomyces* sp. SCA3–4 isolated from rhizosphere soil of opuntia stricta. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1390. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01390>
- Rios-Hernández, T.A., Uc-Vázquez, A., & Evangelista-Martínez, Z. (2021). Biological control of *Fusarium oxysporum* causal agent of gladiolus corm rot by streptomycetes. *Revista mexicana de fitopatología*, 39(3), 391-413. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2105-3>
- Rios-Muñiz, D.E. & Evangelista-Martínez, Z. (2020). Antifungal activity of *Streptomyces* sp. CACIS-2.15CA, as a potential biocontrol agent, against some soil-borne fungi. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00630-7>
- Roy, A. B. (1958). A new species of Azotobacter producing heavy slime and acid. *Nature*, 182, 120–121. <https://doi.org/10.1038/182120a0>
- Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F.I., de los Santos-Villalobos, S., Orozco-Mosqueda, M.C., & Glick, B.R., (2021b). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy*, 11, 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>.
- Sehrawat, A., Sindhu, S.S., & Glick, B.R., (2022). Hydrogen cyanide production by soil bacteria: Biological control of pests and promotion of plant growth in sustainable agriculture. *Pedosphere*, 32 (1), 15–38. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60058-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60058-9)
- Shuping, D. S. S., & Eloff, J. N. (2017). THE USE OF PLANTS TO PROTECT PLANTS AND FOOD AGAINST FUNGAL PATHOGENS: A REVIEW. *African journal of traditional, complementary, and alternative medicines : AJTCAM*, 14(4), 120–127. <https://doi.org/10.21010/ajtcam.v14i4.14>
- Tariq, M. R., Shaheen, F., Mustafa, S., Ali, S., Fatima, A., Shafiq, M., Safdar, W., Sheas, M. N., Hameed, A., & Nasir, M. A. (2022). Phosphate solubilizing microorganisms isolated from medicinal plants improve growth of mint. *PeerJ*, 17, 10:e13782. <https://doi.org/10.7717/peerj.13782>
- Tovar-Pedraza, J. M., Mora-Aguilera, J. A., Nava-Díaz, C., Lima, N. B., Michereff, S. J. Sandoval-Islas, J. S., Câmara, M. P. S. Téliz-Ortiz, D. & Leyva-Mir, S. G. (2020). Distribution and Pathogenicity of Colletotrichum Species Associated With Mango Anthracnose in Mexico. *Plant Disease*, 104 (1), 137-146. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-19-0178-RE>



Yang, Y., Shuai-Wen, Z., Kun-Tai, L. (2019). Antagonistic activity and mechanism of an isolated *Streptomyces corchorusii* strain AUH-1 against phytopathogenic fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35,145. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2720-z>

El uso de bacteriófagos para el control de enfermedades en la agricultura: un caso de estudio para el desarrollo de un biobactericida

Rubén Antonio Olivares Terrones¹, Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar¹, Guillermo Alejandro Solís Sánchez¹, María Inés Siri Tomás² y Gabriel Rincón Enríquez^{1*}

¹Laboratorio de Fitopatología, Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ) Zapopan, Jalisco, México

²Área Microbiología, Departamento de Biociencias, Facultad de Química, Universidad de la República, Uruguay

*Autor de correspondencia: grincon@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

control biológico, fagoterapia, mancha bacteriana del chile

Además de su importancia como causantes de enfermedades, los virus son importantes actores de los ecosistemas y pueden tener múltiples aplicaciones en la investigación, industria y salud. Los bacteriófagos son un tipo especial de virus con potencial para el control de enfermedades bacterianas en el ámbito de la agricultura. En este artículo se describe el desarrollo de un producto a base de bacteriófagos para el control de la mancha bacteriana en el chile (*Capsicum annuum*) y los esfuerzos que se están haciendo para la mejora continua de este producto.

El control biológico

En el diccionario de la lengua española se define la enfermedad como un “Estado producido en un ser vivo por la alteración de la función de uno de sus órganos o de todo el organismo”. En la obra *Fitopatología* de Agrios (1995), se menciona que en las plantas las principales causas de enfermedad son organismos patógenos y factores ambientales. En este artículo nos enfocaremos en las enfermedades causadas por organismos patógenos. Cuando estos son macroscópicos, principalmente animales, el daño es mecánico y puede afectar sistémicamente a la planta al interrumpir el flujo de savia o comprometer significativamente la capacidad del órgano atacado para cumplir su función, por ejemplo, dar soporte en las raíces o tallos, realizar la fotosíntesis o regular la evapotranspiración en las hojas. Otro gran riesgo

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
149-161. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12773571>

Recibido: 24 abril 2024
Revisado: 31 de mayo 2024
Aceptado: 03 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



relacionado con el ataque por plagas en las plantas es que al producir un daño mecánico permiten la entrada de otros patógenos, generalmente microscópicos, en general hongos, bacterias o virus, los cuales causan a su vez una gran variedad de enfermedades con signos y síntomas muy variados, que generalmente causan en última instancia deterioro en el desarrollo de las plantas y la disminución de la productividad de los cultivos.

La enfermedad no es exclusiva de los organismos macroscópicos, las plagas también cuentan con sus propios depredadores y los microorganismos patógenos pueden ser infectados por otros microorganismos. De este fenómeno surge el control biológico. Basándose en la idea de que el enemigo de mi enemigo es mi amigo, en el control biológico se hace uso de organismos vivos como agentes para el control de plagas y enfermedades (Barrera, 2021). Algunos de los casos más conocidos es uno de los pioneros en el control biológico, donde se introdujo una especie de mariquita originaria de Australia para el control del pulgón en California, o el uso de hongos entomopatógenos que infectan y colonizan todo el cuerpo de distintos insectos, a veces incluso modificando su comportamiento como algunos tipos de *Cordyceps*. En el caso de los insectos, es fácil imaginar y comprender el fenómeno, ya que se trata de procesos que podemos ver a simple vista o muy similares a la enfermedad que los humanos mismos experimentamos. Pero más complicado de imaginar es el control biológico de enfermedades, ya que nadie ha visto una bacteria enferma. En general estamos familiarizados con el paradigma de que el pez grande se come al chico; sin embargo, en los patosistemas pareciera que funciona de forma inversa: un organismo pluricelular macroscópico como una planta es infectado por una bacteria microscópica, y para infectar a las bacterias es necesario recurrir a microorganismos submicroscópicos, es decir, a los virus.

Los virus

Probablemente al oír hablar de los virus venga a tu mente algo relacionado con los casi tres años que, en general, vivimos en estado de alerta y precaución sanitaria por la pandemia de COVID19 causada por las diferentes variedades del SARS-CoV-2 o recuerdes alguna vez que sufriste los estragos de la influenza, un “fuego” en el labio o incluso en la pandemia del SIDA, que sigue activa en todo el mundo desde hace alrededor de 43 años, causada por el VIH. Aunque es verdad que todos estos fenómenos son ejemplos de los efectos más palpables, desde nuestra perspectiva humana, de la presencia de los virus en el ambiente, también es verdad que pensar en los virus en esos términos es no hacerle justicia al papel que juegan los virus en los ecosistemas, el que han jugado en la evolución y a su potencial como herramientas para generar soluciones ambientales, tecnológicas y en el área de la salud.



Los virus son organismos fascinantes que se encuentran en una zona gris entre lo que definimos como organismos vivos y materia inerte, su principal fortaleza se basa en su relativa simplicidad. A diferencia de las células, los virus no son capaces de nutrirse, no “crecen” y no son capaces de reproducirse o desplazarse por sí mismos, pero eso no les impide ser los organismos más abundantes y dispersos en la naturaleza. Los virus son muy simples. En general, consisten en un sistema que les permite reconocer un tipo especial de células, generalmente este sistema está unido a otro que les permite inyectar su material genético dentro de la célula que han reconocido y una o varias capas que recubren y contienen el material genético que consiste en una o más cadenas ADN o ARN simples o dobles. Sus capas de recubrimiento pueden consistir en una o más capas de proteínas o lípidos, o combinaciones de estos y otros componentes. Incluso la parte que conecta la región encargada de reconocer y unirse a las células e inyectar el material genético con la parte que lo contiene y protege puede no estar presente en algunos virus. Aun así, los virus causan infecciones que se caracterizan por generar enfermedades difíciles de manejar ya que, al contrario de las bacterias y otros organismos patógenos, estos, al no ser capaces de integrar a su estructura elementos del medio ambiente, no pueden ser “intoxicados” con antibióticos.

Los virus no tienen ningún mecanismo propio que les permita reproducirse o moverse, pero entonces ¿cómo llegan a ser los organismos más abundantes y dispersos? Eso es gracias a su peculiar forma de reproducirse. Como se mencionó antes, una de las partes más indispensables y características de los virus es un mecanismo que les permite reconocer un tipo específico de células e introducir su material genético, ya sea inyectando únicamente la o las cadenas de ácidos nucleicos o introduciendo toda su estructura dentro de la célula. Una vez dentro, la maquinaria de expresión de la célula comienza a producir las proteínas y replicar el material genético del virus en un proceso que culmina en la producción y liberación de una gran cantidad de partículas virales y en la muerte de la célula hospedera (Figura 1). Aunque esta es una visión muy general del proceso, la interacción específica entre cada tipo de virus y célula se puede complicar en gran medida debido a los mecanismos del sistema inmune de las células y muchos virus incluyen mecanismos para luchar contra estos sistemas. En este proceso se producen varias partículas virales a partir de cada célula, hasta cientos de miles de partículas virales por célula, cada una capaz de infectar otra célula y repetir el proceso, por lo que en un ambiente con suficientes células susceptibles de ser infectadas, como un cultivo celular en un laboratorio, o un tejido, sea animal o vegetal, el número de partículas virales crecerá rápidamente de manera exponencial, así, debido a la gran concentración que alcanzan estas partículas virales, se dispersan de manera pasiva debido a la mera entropía.

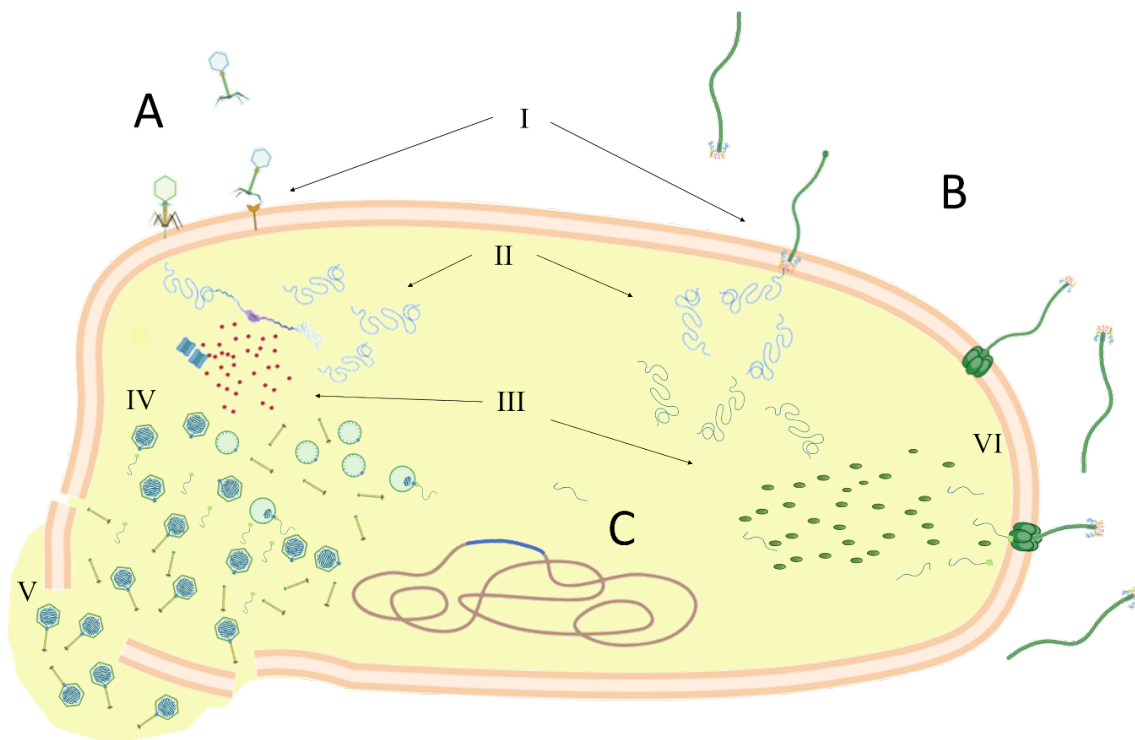


Figura 1. Esquema de los principales ciclos de vida de los bacteriófagos. Tanto el ciclo lítico (A) como el lisogénico (B) comienzan con la interacción entre el mecanismo que el fago tiene para reconocer un elemento exterior de la bacteria (I) para después inyectar su material genético en el interior de la célula donde comienza a replicarlo (II) y expresar sus genes (III). En el ciclo lítico se comienzan a ensamblar las cápsidas de los bacteriófagos en el citoplasma, seguido de una etapa de maduración, donde se introduce el material genético del virus en las cápsidas y se ensamblan con otros elementos del fago, como la cola (IV), para finalmente romper la membrana y liberar los nuevos bacteriófagos (V). En el ciclo de replicación de los bacteriófagos filamentosos, una vez que se han producido los componentes del bacteriófago en cantidad suficiente, se forman poros en la membrana celular, ahí se ensambla el bacteriófago a medida que el material genético es envuelto por las proteínas de la cápside y se libera al exterior (VI). Además, el material genético del bacteriófago se puede integrar al genoma de la bacteria y permanecer como profago hasta que una señal del exterior active el ciclo lítico o lisogénico (C).

La pregunta que surge entonces es: ¿cómo tomamos ventaja de los virus en el control biológico? Muchas de las enfermedades de humanos, animales y plantas son causadas por el crecimiento descontrolado de bacterias en el interior o sobre el organismo. Por la gran cantidad y diversidad de virus en el ambiente, se considera que para cada cepa bacteriana existe, al menos, un virus capaz de infectarlo, por lo que podrían aislarse y propagarse para aplicarlos de forma combinada o sustitutiva de las estrategias de control convencionales.

Los fagos y sus aplicaciones

Los virus que infectan a las bacterias se conocen con el nombre de bacteriófagos, fueron descubiertos en 1917 cuando Felix Hubert d'Herelle se encontró con halos de inhibición en las placas con cultivos asociados a disentería mientras buscaba una vacuna para esta enfermedad. Si bien esta no fue la primera vez que se reportó un hallazgo similar, dos años antes Frederick Twort los había reportado, fue D'Herelle



quien se dio cuenta que estaba ante un tipo de parásito intracelular obligado y les dio el nombre de bacteriófagos. Con el surgimiento de cepas con múltiples resistencias a antibióticos los fagos han cobrado cada vez más relevancia para su uso como terapia.

La fagoterapia se aprovecha de que durante el ciclo de reproducción de la mayoría de los fagos, estos destruyen las células de las bacterias hospederas, que en última instancia puede detener el crecimiento y avance de las infecciones. Los fagos, como virus que son, comienzan la infección de la bacteria hospedera con el reconocimiento de algún elemento ubicado de forma externa en su morfología, como algunos flagelos u otros receptores. La efectividad de la infección de los fagos recae en la presencia de estos receptores y en la afinidad entre los receptores de la bacteria y el mecanismo de reconocimiento del fago, así los microorganismos que un dado fago puede infectar están restringidos a un grupo de bacterias, que puede ir desde unas cuantas cepas de una especie hasta algunas especies relacionadas. Aunque cuando se desconoce la naturaleza del patógeno causante de una enfermedad puede ser una desventaja, las ventajas de esta especificidad supera con creces debido a los estragos en el nivel microecológico y macroecológico que el uso de agentes de amplio espectro puede causar. Por un lado, la aplicación de antibióticos causa severas perturbaciones en la microbiota en los microambientes, como puede ser el caso de la microbiota enterogástrica o de cualquier otra parte del cuerpo de los animales, humanos incluidos, o la microbiota endófitas, epífita o de la rizósfera de las plantas, alterando con ello las relaciones complejas que son parte fundamental del desarrollo de todos los organismos. Además, la liberación masiva de estos compuestos en áreas como la producción pecuaria, agrícola o acuícola, así como su uso inapropiado en el área de la salud ha propiciado la aparición de cepas multirresistentes que son cada vez más un problema económico, mermando la producción del sector primario y de salud con la aparición de infecciones cada vez más difíciles de controlar (Gordillo Altamirano & Barr, 2019).

Una gran ventaja de los fagos es que tienen una plasticidad que los antibióticos y otras estrategias de control carecen, ya que al tener una alta tasa de replicación las mutaciones se acumulan rápidamente, lo que puede modificar su estructura y comportamiento. Además, durante su ciclo de replicación muchos fagos integran su material genético con el de la bacteria que están infectando. Al replicar el ADN viral no es raro que se integren regiones del ADN de la célula junto con el del fago y en consecuencia la descendencia de estos fagos se comportará de manera diferente a su progenie. Esta variabilidad implica que, a pesar de que una cepa pueda generar resistencia contra un tipo de fagos, esta resistencia pueda ser también rápidamente superada por un fago modificado, esto a su vez genera una nueva presión de selección sobre las bacterias, generando una especie de “carrera armamentista” que se traduce en una constante coevolución que se puede aprovechar para tener una mejora constante de las fagoterapias (Stone *et al.*, 2019).



Este proceso de evolución también puede dirigirse para obtener fagos con las características deseadas, pueden ser modificaciones de las características como rangos de hospederos más amplios, mejor resistencia a condiciones del medio o, por ejemplo, mayor especificidad en ciertas condiciones, pero también pueden introducirse características nuevas modificando su genoma mediante técnicas de ingeniería genética. Las aplicaciones de añadir elementos extraños a los fagos se discutirán más adelante. Para generar un proceso de evolución dirigida se puede utilizar un enfoque de selección en el que los fagos se expongan a un agente mutagénico, químico o físico, para luego someter los fagos en un sistema de selección que ayude a distinguir aquellos fagos que hayan adquirido las características deseadas. Algunos enfoques alternativos pueden ser la aplicación de un agente mutágeno no sobre el fago, sino directamente sobre el genoma introducido en algún sistema, como una levadura, donde el genoma viral del fago se mantiene como un plásmido, pero no se ensamblan las partículas del fago ni se produce una infección en el hospedero. También se puede tomar ventaja de la capacidad de los fagos para mutar e introducir en su genoma elementos genéticos del ambiente, incluyendo material genético de otros fagos que estén infectando las mismas bacterias, ya que se han logrado generar cepas con características nuevas aplicando sólo un factor, como la radiación UV durante ciclos de propagación y exposición hasta obtener fagos más resistentes. También se logró incrementar el rango de hospederos de un par de fagos que se usaron para coinfectar algunas cepas resistentes hasta obtener una línea capaz de infectar a todas las cepas usadas en el estudio (Burrowes *et al.*, 2019; Tom *et al.*, 2018).

La formación de biopelícula es una de las estrategias de las bacterias para evitar el efecto de los antibióticos, antimicrobianos e incluso los efectos del sistema inmune y el ataque de los fagos, pero también podemos explotar herramientas basadas en fagoterapia para manejarlas. Algunos bacteriófagos producen e incluyen en su estructura algunas enzimas que les permiten penetrar en las biopelículas de manera que, dependiendo del tipo de fagos usados en la fagoterapia, pueden mantener su efectividad aun si existe presencia de biopelícula. Incluso si los fagos logran propagarse dentro de una biopelícula, esta matriz puede fungir como depósito de bacteriófagos potenciando la eficacia de la infección. Las enzimas que les permiten a los fagos penetrar en la biopelícula son principalmente lisinas y depolimerasas. Estos dos tipos de enzimas pueden usarse como antimicrobianos aislados. Las lisinas degradan el peptidoglicano de la pared celular en las bacterias Gram negativas que pueden tener diferentes grados de especificidad. Las depolimerasas, por su parte, degradan los polímeros extracelulares, lo cual ayuda a los fagos a llegar a su sitio de reconocimiento. Además, al degradar la estructura de las biopelículas, las lisinas y depolimerasas pueden interferir en la comunicación celular (Quorum Sensing) disparando diferentes mecanismos de virulencia y resistencia a antibióticos y



fagos. Por otro lado, al degradar la estructura de las biopelículas pueden aumentar la sensibilidad de las bacterias a los antibióticos. Esto hace factible la aplicación de la fagoterapia o de productos derivado de fagos en combinación con otras estrategias de control obteniendo resultados con sinergias positivas (Ferriol-González & Domingo-Calap, 2020).

Antes de centrar la atención en las aplicaciones de los fagos en la agricultura, nos gustaría mencionar las aplicaciones de los fagos en ámbitos como la investigación y aplicaciones ambientales. La importancia de los fagos va más allá de su aplicación en el control de las bacterias. Por ejemplo, se obtuvo la evidencia necesaria para solucionar el debate sobre la naturaleza del material genético (proteínas versus ácidos nucleicos) y se ha explorado el potencial de los fagos para la producción de algunos péptidos, los cuales se expresan unidos a las proteínas de la cápside, estos péptidos pueden tener múltiples aplicaciones. Modificando su genoma, los bacteriófagos pueden ser aprovechados como vectores de transformación o como acarreadores de fármacos al encapsular dentro de la estructura de las cápsides los fármacos que luego son liberados de manera específica.

El uso de fagos en la agricultura

Para el control de las enfermedades causadas por bacterias en la agricultura se aplican sobre los cultivos tratamientos a base de antibióticos y sales minerales, de los cuales una buena parte de los principios activos pueden terminar en los cuerpos de agua y otros ambientes, lo que ha contribuido a la aparición de cepas resistentes, tanto de las especies fitopatógenas como de otros microorganismos ambientales e incluso a especies de importancia clínica. Por eso, el uso de alternativas a los antimicrobianos tradicionales en la agricultura es muy relevante. La fagoterapia y sus derivados son, por lo tanto, una de las alternativas obvias que surgen para el control de enfermedades de plantas de origen bacteriano.

En el ámbito de la agricultura, la fagoterapia enfrenta sus propias problemáticas que se deben solucionar para lograr aplicaciones exitosas a escalas prácticas en el campo. La primera que es necesario mencionar es que la exposición a la radiación UV disminuye rápidamente la viabilidad de los fagos, por lo que al aplicarse en campo, donde una parte de la radiación de la luz del sol está en las frecuencias de la radiación UV, es un problema especialmente cuando las bacterias fitopatógenas afectan a la planta en las hojas, ya que al aplicar algún producto basado en bacteriófagos este podría perder rápidamente su efectividad si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo. Algunas de estas medidas pueden ser culturales, como realizar la aplicación al atardecer o por la noche para evitar el impacto de las horas de mayor radiación antes de que puedan interactuar los fagos con sus bacterias. Además, se pueden formular los fagos para protegerlos de la radiación. Se han estudiado productos orgánicos para este



fin, como la leche desnatada, almidón o sacarosa. Más adelante se abordará con más detalle el caso de otra opción con una formulación novedosa a base de nanopartículas (Fernández *et al.*, 2018). Otro factor que afecta la infectividad de los bacteriófagos en la agricultura son las características fisicoquímicas del suelo como el pH, la actividad de agua y la composición. La variación de estas características del suelo puede afectar la sobrevivencia y permanencia de los fagos en el suelo, desde donde pueden ser transportados hasta las hojas por insectos vectores o por factores ambientales como el aire, el agua o por movimientos mecánicos (Buttimer *et al.*, 2017).

Existen ciertas preocupaciones acerca de las consecuencias que podría tener la liberación masiva de bacteriófagos al ambiente, especialmente la posibilidad de que se repita la historia de los antibióticos y comiencen a aparecer cepas multi fago-resistentes, ya que se ha reportado que la presión de selección, especialmente en modelos animales, puede favorecer la expresión de mecanismos de antivirales, como el sistema CRISPR-Cas o la aparición de mutaciones de novo que modifiquen cualquiera de los pasos del ciclo de los fagos. Estas mutaciones requieren de un proceso de adaptación, ya que se ha observado que la aparición de mutaciones que le confieren resistencia contra los fagos a las bacterias afecta negativamente el desarrollo de las bacterias y su patogenicidad. Por otro lado, una estrategia que ha demostrado ser eficiente y sencilla para disminuir considerablemente la aparición de tales cepas resistentes en la aplicación de cocteles que incluyan fagos con diferentes espectros de hospederos y mecanismos de acción.

Como se mencionó anteriormente, una de las grandes virtudes de la fagoterapia es su gran flexibilidad ya que los fagos están en evolución constante a la par de los demás microorganismos, incluidos los fitopatógenos; sin embargo, para aprovechar esta característica es necesario actualizar constantemente las formulaciones de los productos basados en fagos, probablemente sustituyendo los fagos presentes en la formulación, lo cual requiere un nuevo registro de producto, con todos los esfuerzos de investigación, administrativos, legales y económicos que eso implica.

El uso de fagos en el control de la mancha bacteriana del chile

La mancha bacteriana es una enfermedad causada por cuatro patovares de tres especies diferentes de *Xanthomonas* spp. que afectan a algunas solanáceas, las de mayor importancia económica son el chile (*Capsicum a.*) y el jitomate (*Solanum lycopersicum*). Los signos más visibles de esta enfermedad en el chile son puntos o manchas cloróticas en las hojas, tallos y frutos. Después de unos días, estas manchas cloróticas comienzan a necrosar el tejido, primero en el centro de la mancha y después comienza a extenderse hasta marchitar y defoliar la planta. Esta enfermedad merma la productividad de los cultivos (Figura 2), causando cuantiosas pérdidas a los productores de Chile cada año (López-Vielma *et al.*, 2016).



Figura 2. Síntomas de la mancha bacteriana en el cultivo del chile (tomado de Ibarra, 2019)

El manejo de esta enfermedad se realiza normalmente con productos a base de cobre y algunos antibióticos como la estreptomicina. Sin embargo, se han identificado varios plásmidos en cepas de *Xanthomonas* que codifican genes de resistencia al cobre y cepas resistentes a los antibióticos. Como resultado se ha vuelto cada vez más complicado lograr tratamientos efectivos contra esta enfermedad (Carrillo Fasio *et al.*, 2001). Otras opciones para el manejo de la mancha bacteriana son culturales, como la rotación de cultivos, el uso de semillas y plántulas certificadas libres de patógenos o el manejo apropiado del riego y otros manejos. Se han explorado también opciones de control biológico mediante el uso de microorganismos antagonistas o la aplicación de productos como derivados como la quitina (Marin *et al.*, 2019). Actualmente en EUA existe un producto basado en fagos formulados para el control de varias especies de *Xanthomonas* patógenas en varios cultivos [<https://www.agriphage.com/>].

La mancha bacteriana es una enfermedad que causa grandes pérdidas a los productores en todas las regiones productoras de chile en México. En 2016 en el laboratorio de fitopatología del CIATEJ se iniciaron esfuerzos para buscar soluciones a esta problemática. Se aislaron cepas de *Xanthomonas* de 10 sitios donde se cultiva el chile que tuvieron presencia de la mancha bacteriana. Además, en un sitio de colecta en el municipio de Yurécuaro, Michoacán, se identificaron dos bacteriófagos con características prometedoras, ya que lograron formar placas líticas en



todas las cepas evaluadas, con morfologías bien diferenciadas e iguales en todas las cepas. Estos fagos fueron denominados como Φ XaF13 y Φ XaF18 (Figura 3, López-Vielma *et al.*, 2016).

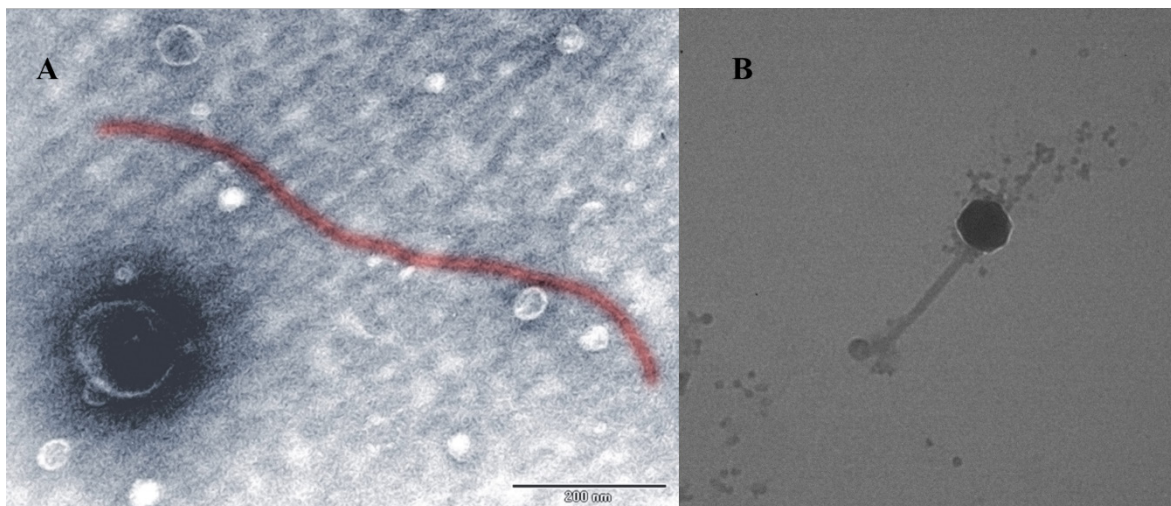


Figura 3. Micrografía de los bacteriófagos Φ XaF13 (A) y Φ XaF18 (B). Se observa que mientras que el fago Φ XaF18 tiene una estructura típica con cápside icosaédrica y una cola, el fago Φ XaF13 tiene una estructura filamentososa.

La principal limitante para aplicar bacteriófagos para el control de la mancha bacteriana y otras enfermedades de origen bacteriano en la agricultura es, como se mencionó anteriormente, la radiación UV, se comenzó a evaluar diversas formulaciones que pudieran proteger a los fagos de los efectos de la radiación UV, considerando dos opciones: una basada en extractos vegetales y otras basadas en nano partículas de zinc. Los extractos de romero (*Rosmarinus officinalis*) y chicalote (*Argemone mexicana*) tuvieron efecto protector contra la radiación UV en el fago Φ XaF13 permitiendo que la concentración de bacteriófagos en la solución con extracto se mantuviera por encima de la concentración sin extractos después de 90 min de exposición a la luz UV, ya que este fago mostró por sí mismo una resistencia alta a la radiación UV, mayor que la mayoría de los fagos. Aunque, por otro lado, otros extractos como los de tomillo (*Thymus vulgaris*), orégano mexicano (*Lippia graveolens*) y mejorana (*Oreganum majorana*) afectaron de manera negativa la viabilidad de los fagos en períodos de tiempo relativamente cortos (Avalos Salgado, 2019).

Por su parte, en el caso del fago Φ XaF18, el cual es más susceptible a la radiación UV, se evaluaron diferentes formulaciones con nano partículas de zinc, de las cuales la mayoría no afectaron negativamente la concentración de fagos en periodos prolongados y además protegieron efectivamente a los fagos de la radiación UV. Se logró mantener el título prácticamente sin alteración después de una hora de exposición, mejorando el desempeño de la una formulación de leche descremada y sacarosa que se utiliza comúnmente a nivel experimental para este fin. La formulación con el mejor desempeño en protección contra la radiación UV se evaluó posteriormente para el



control de la enfermedad de la mancha bacteriana a nivel de invernadero y de campo. En ambas pruebas la formulación del bacteriófago con las nanopartículas de zinc logró superar con diferencias estadísticamente significativas a los tratamientos donde se aplicó el fago formulado con leche descremada y sacarosa, el fago sin formular y el tratamiento con antibiótico como lo recomienda el productor (Ibarra Rivera, 2019). Con este resultado se logró formular un producto que incluye un coctel con ambos fagos y la formulación a base de nanopartículas de zinc, el cual está en proceso de transferencia para lograr en un futuro próximo colocar en el mercado mexicano el primer producto para el control biológico de enfermedades bacterianas de plantas a base de bacteriófagos.

El proceso no termina ahí, ya que al empezar a liberarse sistemática y masivamente en el agroecosistema, puede perder efectividad tras unos años, por lo que es necesario innovar constantemente. Si bien podría ser suficiente un enfoque basado en la prospección constante de fagos que mantengan infectividad contra las cepas de mayor impacto, existe otro enfoque posible. Se conoce el genoma de los dos fagos tanto el Φ XaF13 (Solís-Sánchez *et al.*, 2020) como el Φ XaF18 (Ríos-Sandoval *et al.*, 2020). El primero se destaca por su simplicidad, ya que es un genoma de tan sólo alrededor de 7 000 bases, en las cuales están codificadas todas sus características de infectividad, espectro de hospederos y resistencia a la radiación UV.

Por lo tanto, la aplicación de un enfoque basado en el mejoramiento mediante mutaciones aleatorias y selección nos ofrece, por un lado, la oportunidad no sólo de mantener la efectividad del coctel, por el otro, también se busca aumentar la resistencia del fago a la radiación UV con la intención de lograr una formulación que alcance la misma eficacia en campo para el control de la mancha bacteriana sin requerir de un agente protector. Además, mediante el análisis de los genomas de las líneas de fagos que resulten ser más resistentes y mediante la comparación con el genoma silvestre o incluso de otros fagos susceptibles de identificar aquellos elementos que estén involucrados en esta resistencia y que podrían servir para otras aplicaciones, como formulaciones protectoras orgánicas a base de estas proteínas u otros elementos del fago, que pudieran ser aprovechadas en aplicaciones de control biológico con fagos u otros microorganismos que no esten relacionados con la mancha bacteriana del Chile, o incluso podrían tener aplicaciones en otras áreas fuera de la fitopatología como la industria cosmética o alimenticia (Juárez García, 2022).

Conclusiones

Dado que las técnicas tradicionales para el control de plagas y enfermedades de plantas, además de perder eficacia por la aparición de patógenos resistentes pueden también causar otros problemas ecológicos e incluso de salud, el control biológico parece más una necesidad que una alternativa. En el caso de las enfermedades bac-



terianas por la aparición de bacterias multirresistentes, el control biológico no sólo es necesario en las enfermedades de plantas, también es necesario aplicarlo para enfermedades que afectan animales y seres humanos; para ello la herramienta más prometedora son los bacteriófagos. Una característica del control biológico, que es a la vez una de sus mayores virtudes y de sus mayores retos, es la especificidad, una solución para un problema, por lo que es necesario hacer muchos esfuerzos para generar estas soluciones y que estén en un proceso de mejora continua. Este es el caso de los esfuerzos que se vienen realizando para el control de la mancha bacteriana del chile, pero también para otras muchas problemáticas.

Referencias

- Agrios, G. N. (1995). *Fitopatología* (Vol. 1). Limusa
- Avalos Salgado, F. A. (2019). *Desarrollo de una formulación protectora a base de extractos vegetales para la aplicación de bacteriófagos en el control biológico de Xanthomonas axonopodis pv. vesicatoria* [tesis de maestría]. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- Barrera, J. F. (2021). Concepto, alcances e implicaciones del control biológico. En H. C. Arredondo Bernal, F. Tamayo Mejía, & L. Á. Rodríguez del Bosque (Eds.), *Fundamento y práctica del Control Biológico de plagas y enfermedades* 1ª ed., Vol. 1 (pp. 15–39). bba.
- Burrowes, B., Molineux, I., & Fralick, J. (2019). Directed *in Vitro* Evolution of Therapeutic Bacteriophages: The Appelmans Protocol. *Viruses*, 11(3), 241. <https://doi.org/10.3390/v11030241>
- Buttimer, C., McAuliffe, O., Ross, R. P., Hill, C., O'Mahony, J., & Coffey, A. (2017). Bacteriophages and Bacterial Plant Diseases. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00034>
- Carrillo Fasio, J. A., García Estrada, R. S., Allende Molar, R., Márquez Zequera, I., Millán Ocampo, S., & Gaxiola Espinoza, G. (2001). Sensibilidad a Cobre de Cepas de *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* (Doidge) Dye, en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19, 72–77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61219110>
- Fernández, L., Gutiérrez, D., Rodríguez, A., & García, P. (2018). Application of Bacteriophages in the Agro-Food Sector: A Long Way Toward Approval. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00296>
- Ferriol-González, C., & Domingo-Calap, P. (2020). Phages for Biofilm Removal. *Antibiotics*, 9(5), 268. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9050268>
- Gordillo Altamirano, F. L., & Barr, J. J. (2019). Phage Therapy in the Postantibiotic Era. *Clinical Microbiology Reviews*, 32(2). <https://doi.org/10.1128/CMR.00066-18>

- Ibarra Rivera, G. (2019). *Control biológico de la mancha bacteriana (Xanthomonas axonopodis pv. Vesicatoria) en el cultivo de chile mediante bacteriófagos formulados* [tesis de Maestría]. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- Juárez García, M. F. (2022). *Genes involucrados en la resistencia a la luz u.v. en bacteriófago Φxaf13* [tesis de Maestría]. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- López-Vielma, C., Solís, A., Quiñones Aguilar, E. E., Qui, J., & Rincon-Enriquez, G. (2016). Aislamiento del agente causal de la mancha bacteriana de chile en las regiones productoras de Jalisco, Zacatecas y Michoacán. *Biotecnología y sustentabilidad*, 1(1), 141-143. https://www.researchgate.net/publication/311102822_Aislamiento_del_agente_causal_de_la_mancha_bacteriana_de_chile_en_las_regiones_productoras_de_Jalisco_Zacatecas_y_Michoacan
- Marin, V. R., Ferrarezi, J. H., Vieira, G., & Sass, D. C. (2019). Recent advances in the biocontrol of *Xanthomonas* spp. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(5), 72. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2646-5>
- Ríos-Sandoval, M., Quiñones-Aguilar, E. E., Solís-Sánchez, G. A., Enríquez-Vara, J. N., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Complete Genome Sequence of *Xanthomonas vesicatoria* Bacteriophage ΦXaF18, a Contribution to the Biocontrol of Bacterial Spot of Pepper in Mexico. *Microbiology Resource Announcements*, 9(16). <https://doi.org/10.1128/MRA.00213-20>
- Solís-Sánchez, G. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Fraire-Velázquez, S., Vega-Arreguín, J., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Complete Genome Sequence of XaF13, a Novel Bacteriophage of *Xanthomonas vesicatoria* from Mexico. *Microbiology Resource Announcements*, 9(5). <https://doi.org/10.1128/MRA.01371-19>
- Stone, E., Campbell, K., Grant, I., & McAuliffe, O. (2019). Understanding and Exploiting Phage-Host Interactions. *Viruses*, 11(6), 567. <https://doi.org/10.3390/v11060567>
- Tom, E. F., Molineux, I. J., Paff, M. L., & Bull, J. J. (2018). Experimental evolution of UV resistance in a phage. *PeerJ*, 6, e5190. <https://doi.org/10.7717/peerj.5190>



Elicitores para mejorar la producción vegetal: vacunas vegetales

María del Sol Cuellar-Espejel¹, Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar¹, Rodolfo Hernández-Gutiérrez², Juan Carlos Mateos-Díaz³, Sergio David Valerio-Landa⁴, Gabriel Rincón-Enríquez^{1*}

¹Laboratorio de Fitopatología de Biotecnología Vegetal. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

²Biotecnología Médica y Farmacéutica. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

³Biotecnología Industrial. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

⁴COSMOCEL, Monterrey, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: grincon@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

biocontrol, elicitores, fitopatógenos, inductores, seguridad alimentaria

Los elicitores o inductores son moléculas clave en la respuesta de las plantas a su entorno y tienen un potencial significativo en la agricultura. Estas moléculas pueden ser de origen biótico o abiótico, capaces de desencadenar respuestas defensivas en las plantas, fortaleciendo su resistencia a patógenos y estimulando su crecimiento. Su uso puede reducir la dependencia de agroquímicos y fomentar prácticas agrícolas sostenibles. Identificar elicitores efectivos y comprender su formulación es fundamental para maximizar su eficacia en la agricultura. La aplicación de elicitores en la agricultura tiene el potencial de mejorar la producción vegetal y garantizar la seguridad alimentaria, por lo que los avances tecnológicos y de investigación en este campo pueden impulsar aún más su uso y contribuir a abordar los desafíos actuales en la agricultura como la crisis climática y la falta de legislación, además de la presión de los patógenos y los efectos del cambio climático.

Introducción

El calentamiento global y el cambio climático ocasionan que la frecuencia de condiciones de estrés abiótico y biótico en las plantas aumente día con día. El estrés biótico, causado por patógenos y plagas, genera pérdidas sustanciales en los cultivos del 20 al 30% (Ceulemans *et al.*, 2021). Esto amenaza la seguridad

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
163-171. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12773668>

Recibido: 23 abril 2024
Revisado: 28 de mayo 2024
Aceptado: 03 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



alimentaria mundial debido a que las condiciones del medio ambiente alteraran plagas y patógenos, lo que provoca la evolución de los mismos e impacta negativamente en las interacciones huésped-patógeno. Esta actividad provoca la aparición de nuevas cepas de patógenos más resistentes y, por ende, provoca mayor severidad en las enfermedades de las plantas (Singh *et al.*, 2023).

Estas nuevas interacciones entre patógenos y medio ambiente repercutirán en el manejo de enfermedades, ya que se requerirán de diferentes controles químicos, biológicos y culturales que tomen en cuenta las normativas para agroquímicos que se han vuelto más estrictas ante la afectación medioambiental necesitando de nuevos compuestos menos dañinos (Singh *et al.*, 2023).

Es conocido que los agroquímicos, como los pesticidas, herbicidas y fertilizantes, se utilizan comúnmente en la agricultura para proteger los cultivos de plagas, malezas y enfermedades. Sin embargo, el uso excesivo o incorrecto de estos productos pueden tener efectos negativos como la toxicidad directa en plantas y resistencia a los agroquímicos, lo cual puede llevar a la clorosis, necrosis y, en casos extremos, a la muerte de la planta. Además de que pueden interferir con los procesos metabólicos y fisiológicos, alterando su crecimiento y desarrollo. Por otro lado, las consecuencias en el medio ambiente por el uso de estos productos, como lo es la contaminación del suelo y el agua, impactan negativamente en la biodiversidad al reducir la diversificación de especies en los campos agrícolas. Por lo que todos estos efectos pueden reducir el rendimiento y la calidad de los cultivos, lo que a su vez puede afectar negativamente la economía de los agricultores y la seguridad alimentaria a nivel global.

En este contexto y frente a la creciente demanda de prácticas agrícolas eficientes y sostenibles para combatir las enfermedades patógenas, existen moléculas que actúan como mensajeros, desencadenando respuestas específicas en las plantas. Estos mensajeros, conocidos como inductores o elicitores (proveniente del inglés, traducido como "elicitador" o como "inductor" o "elicitador de respuesta"), representan una alternativa prometedora ya que pueden activar las defensas de las plantas, además de mejorar el rendimiento de los cultivos, tanto en cantidad como en calidad de los alimentos y a su vez reducir su susceptibilidad a las plagas y enfermedades. Al utilizar inductores de resistencia vegetal, los agricultores pueden reducir su dependencia a los agroquímicos y promover prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Todd *et al.*, 2023). Por lo que la aplicación de elicitores en la agricultura ofrece importantes ventajas (Figura 1), tales como:

- Fortificación de cultivos durante su temporada de crecimiento, además de mejorar el desarrollo de las raíces aumentando la microflora del suelo, por lo que no tienen efectos tóxicos siendo así seguros para el medio ambiente.



- La producción de agentes de biocontrol, como los elicitores, suelen ser fáciles de elaborar y se puede lograr producir a gran escala para una mejora agrícola generalizada. Además de tener buena rentabilidad, ya que son relativamente económicos comparados con otros métodos.
- La especificidad que tienen con determinadas plantas provee la precisión con la que una planta puede reconocer y responder a un estímulo particular, brindando así eficacia en la defensa y adaptación al entorno, lo que reduce la probabilidad de desencadenar respuestas inapropiadas o dañinas en la planta y evita efectos secundarios como la inhibición del crecimiento o inducir un estrés extra a la planta.

Por lo anterior, la importancia de la aplicación de elicitores en la agricultura para abordar la resistencia ante patógenos, así como la reducción de los efectos del cambio climático en la seguridad alimentaria, es fundamental para prosperar en diversos entornos y garantizar que las plantas puedan defenderse de manera efectiva contra amenazas específicas (Kumar *et al.*, 2024).

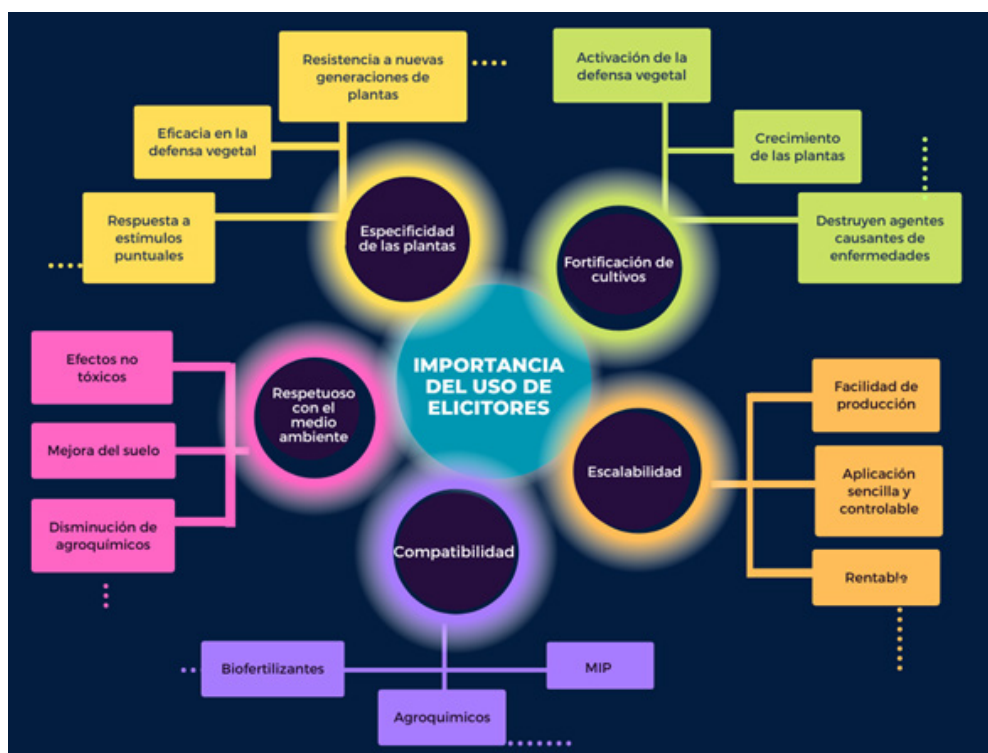


Figura 1. Importancia del uso de elicitores en la agricultura

¿Qué son los elicitores?

Los elicitores son moléculas, generalmente de origen microbiano o vegetal, que activan cualquier tipo de defensa en las plantas. Estos compuestos pueden ser reconocidos por los receptores de la superficie celular de las plantas, desencadenando



una cascada de señales que culmina en la activación de genes relacionados con la defensa y con una actividad inhibidora de fitopatógenos (Zehra *et al.*, 2021).

Los elicitores son estímulos que provocan estrés y pueden activar respuestas defensivas y adaptativas en las plantas cuando se administran en cantidades reducidas, estimulando la producción de metabolitos secundarios. Las plantas, al estar en constante exposición a situaciones estresantes, han desarrollado mecanismos de tolerancia para enfrentar entornos adversos y experimentar cambios mínimos en su estructura física (Caicedo *et al.*, 2021). Los elementos estresantes para las plantas se dividen en dos categorías, dependiendo de su origen y su efecto en las plantas, siendo estos bióticos o abióticos (Figura 2).

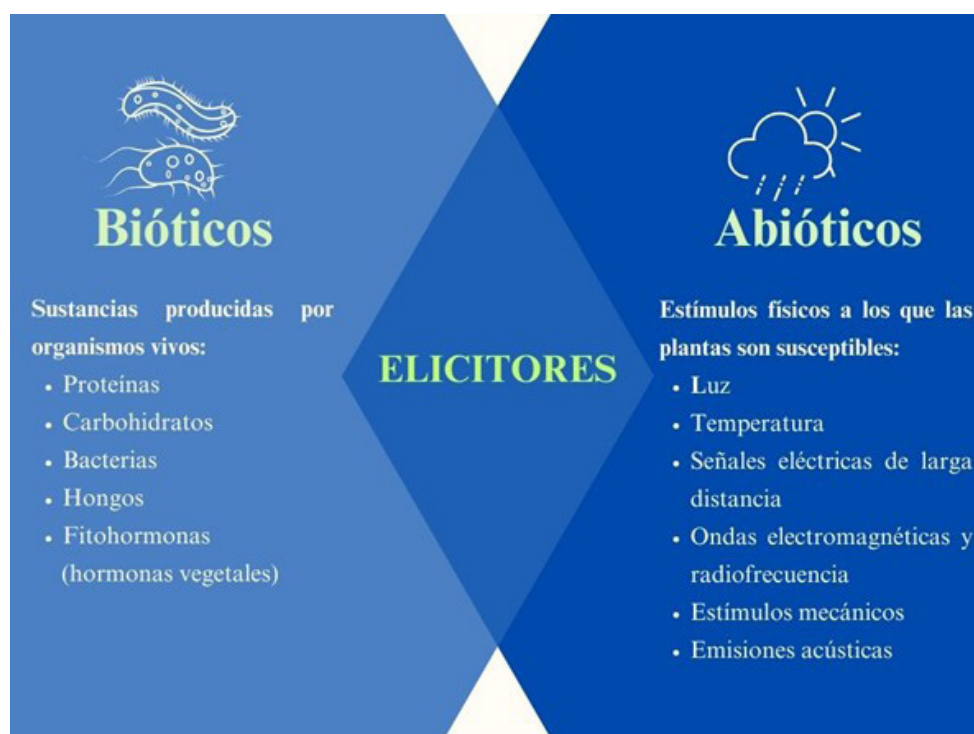


Figura 2. Factores de estrés en las plantas

Origen y naturaleza de los elicitores

Los elicitores son diferentes entre sí, en función de su origen, características y composición molecular, los cuales ofrecen una variedad de estímulos que pueden desencadenar respuestas específicas (Zehra *et al.*, 2021). Por lo que pueden ser de origen biótico (provenientes de organismos vivos) o abiótico (no biológico). Los elicitores pueden ser formulados de compuestos externos a la planta (apoplásticos) como células completas y extractos de microorganismos, como lo son los patrones moleculares asociados a patógenos (PAMP), patrones moleculares asociados a microorganismos (MAMP) y patrones moleculares asociados a nematodos (NAMP), los cuales generan una variedad de respuesta de defensa. En algunos casos los patrones



moleculares asociados a herbívoros (HAMP) también provocan bioestimulación al crecimiento, a la resistencia, al estrés y a la calidad de los cultivos. Además, los compuestos internos de la planta, como son los patrones moleculares asociados a daños (DAMP), pudiendo ser extractos de plantas o algún grupo de compuestos específicos, también son considerados como elicitores (González *et al.*, 2020). Los efectores identificados actualmente pueden incluir metabolitos secundarios, ARN pequeños, pero la mayoría son de naturaleza proteica, con una extensión máxima de 400 aminoácidos. Estos elicitores pueden desempeñar varias funciones, expresarse en diferentes momentos y, en su mayoría, interfieren con las señales de la planta, la síntesis de fitohormonas o los mecanismos de defensa (Todd *et al.*, 2023).

Por otro lado, los elicitores abióticos como lo es la luz, además de ser esencial para la fotosíntesis, influyen en el crecimiento, desarrollo y morfogénesis de las plantas además de regular la producción de metabolitos secundarios (SM). El desarrollo y los procesos fisiológicos de las plantas están condicionados por un intervalo específico de temperatura, y su respuesta al estrés térmico varía según la especie, la intensidad y duración del estrés, así como la etapa de desarrollo, por lo que la temperatura y la luz son poderosos elicitores en las plantas. Estudios han demostrado que el estrés térmico puede inducir la biosíntesis de SM, como compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides y terpenoides los cuales pueden inducir respuestas de defensa en las plantas que actúan como señales de alerta (Humbal y Pathak, 2023).

Sistema inmune de las plantas y la detección de elicitores

Las plantas son susceptibles al ataque o infección por bacterias, hongos, insectos y herbívoros, por lo que el sistema inmunológico de estas es una red compleja de respuestas de defensa que les permiten resistir y adaptarse a los desafíos ambientales. A pesar de que su sistema inmunológico no es tan sofisticado como el de los animales, las plantas pueden resistir a las enfermedades y los daños causados por estos organismos a través de la inmunidad celular innata y la señalización sistémica en el lugar de la infección (Abdul *et al.*, 2020). Este sistema de defensa vegetal tiene dos componentes principales: la inmunidad innata y la inmunidad adquirida. La inmunidad innata es la primera línea de defensa y es activada por receptores de reconocimiento de patrones (RRP), los cuales detectan PAMP o daño celular (Zehra *et al.*, 2021). La inmunidad innata de las plantas consta de dos partes, la inmunidad activada por PAMP, llamada inmunidad desencadenada por patógenos (PTI) y la inmunidad activada por efectores (ETI), donde producen proteínas de resistencia (R) que reconocen y obstaculizan la actividad de los efectores (Ceulemans *et al.*, 2021).

Cuando las plantas activan su inmunidad innata, lo hacen utilizando receptores de reconocimiento de patrones (PRR) que son capaces de detectar y percibir específicamente MAMP o PAMP. Este proceso crucial se logra mediante la resistencia



no huésped, que se refiere a la capacidad de la planta para defenderse contra una amplia gama de patógenos o mediante el reconocimiento de las proteínas R que contrarresta eficazmente las moléculas efectoras de patógenos específicas de la raza u especie (Abdul *et al.*, 2020). Esto da como resultado una serie de respuestas que incluyen el cierre de estomas, la producción de fitoalexinas y la liberación de especies reactivas de oxígeno extracelulares (ROS) para así prevenir la propagación y crecimiento del patógeno (Ceulemans *et al.*, 2021).

Por otro lado, la inmunidad adquirida es activada por el reconocimiento específico de patógenos y está mediada por las proteínas R, siendo una respuesta más lenta que la inmunidad innata, pero que proporciona una defensa más específica y duradera contra los patógenos (Zehra *et al.*, 2021) (Fig. 3). Los compuestos de origen biológico que secretan las plantas en beneficio del fitopatógeno y a menudo inducen susceptibilidad a la enfermedad.



Figura 3. Interacción patógeno-huésped. Los patógenos son capaces de secretar efectores hacia el hospedero para impedir su reconocimiento por la planta y favorecer su propio desarrollo. Mientras que la planta activa sus línea de defensa, lo que induce la respuesta del sistema inmune

En general, cuando un elicitador activa el sistema inmune de una planta, desencadena una cascada de eventos que culminan en la expresión de genes relacionados con la defensa, como la producción de fitoalexinas, péptidos antimicrobianos y enzimas que degradan la pared celular de los patógenos, lo que significa que las plantas pueden activar defensas en partes distantes del organismo después de la exposición a un elicitador. Además de la activación de respuestas defensivas, los elicitores también pueden inducir respuestas de bioestimulación en las plantas, lo que significa que pueden estimular el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Estas respuestas incluyen la promoción del crecimiento de las raíces, la mejora de la absorción de



nutrientes y la estimulación de la producción de metabolitos secundarios benéficos. Por lo tanto, los elicitores pueden tener un doble efecto positivo en las plantas, ya que no sólo las protegen de los patógenos, sino que también pueden mejorar su salud y rendimiento. Es por ello que para el uso de elicitores es crucial identificar aquellos que son capaces de activar respuestas de defensa y bioestimulación en las plantas, así como tomar en consideración la formulación adecuada de estos para su aplicación y maximizar su eficacia según sea su origen y naturaleza.

Además, para garantizar una detección rápida del estrés y el desencadenamiento de respuestas defensivas en la planta es necesario comprender qué tipos y cantidades de factores estresantes o bioestimulantes pueden provocar cambios epigenéticos en la planta. Estas consideraciones son fundamentales para activar adecuadamente el sistema de defensa y, por ende, para la adaptación fisiológica frente al estrés (Caicedo *et al.*, 2021).

Desafíos y futuro del uso de elicitores

El interés en el uso de elicitores y su relevancia en la agrobiotecnología han experimentado un aumento en la última década, convirtiéndose a nivel mundial en un área de investigación prioritaria en el estudio de las interacciones entre fitopatógenos y sus hospederos. Por lo que podrían emplearse los efectores para el control biológico por su gran potencial en el futuro; pero todavía enfrentan varios desafíos (Todd *et al.*, 2023).

Uno de los mayores desafíos es abordar una pronta respuesta ante la crisis climática, ya que el progreso tecnológico se ve limitado en su capacidad para adaptarse a la crisis climática, así como sus efectos que enfrenta la agricultura en un mundo cambiante. A pesar de las extensas investigaciones a lo largo de los años, la importancia del control biológico en el manejo de la salud vegetal sigue siendo relativamente insignificante en comparación con la creciente necesidad de alternativas a los métodos de control basados en químicos. Por lo que, el desarrollo de productos ecológicamente amigables al inicio es costoso y requiere de más tiempo para su desarrollo (Singh *et al.*, 2023 & Lahlali, *et al.*, 2022).

Otro desafío que presentan es la identificación de elicitores específicos para cada planta y patógeno, lo que requerirá una mayor comprensión de los mecanismos de acción de los elicitores para desarrollar productos de biocontrol que sean altamente eficientes contra patógenos vegetales en la agricultura (Lahlali, *et al.*, 2022).

El objetivo principal de la estimulación generada por los elicitores es influir en las vías bioquímicas para generar metabolitos secundarios, pero no se puede generalizar el efecto de estas estrategias dado que la respuesta del metabolismo vegetal depende no sólo del modelo de estudio, sino también por la naturaleza, concentración y duración de los estímulos aplicados (Caicedo *et al.*, 2021).



Finalmente, la falta de legislación sobre la gestión de agroquímicos, así como el registro de nuevos controles biológicos, puede ser un desafío ya que se basan en una versión modificada a los productos químicos convencionales. Es necesario identificar a los bioestimulantes con estándares de seguridad y aceptables para su comercialización que cumplan con los protocolos tradicionales en evaluaciones de toxicología y ecotoxicología aun cuando gran mayoría de estas herramientas ecológicas no lo requieran (Caicedo *et al.*, 2021).

Conclusión

Los elicitores o inductores son moléculas fundamentales para entender cómo las plantas responden a su entorno y cómo pueden ser utilizadas en la agricultura, por lo que tienen un gran potencial para su uso práctico y es probable que jueguen un papel cada vez más importante en el futuro a pesar de los desafíos que enfrentan. Su capacidad para activar respuestas defensivas en las plantas, fortalecer su resistencia a patógenos y estimular su crecimiento los convierte en herramientas valiosas para mejorar la producción vegetal y garantizar la seguridad alimentaria. La identificación de elicitores efectivos y la comprensión de su formulación son aspectos cruciales para maximizar su eficacia en la agricultura. Reducir la dependencia de agroquímicos y fomentar prácticas agrícolas sostenibles son beneficios adicionales que los elicitores pueden ofrecer. Avances tecnológicos y de investigación en este campo pueden impulsar aún más su uso y contribuir a abordar los desafíos actuales en la agricultura.

Con una mayor comprensión de los mecanismos de acción de los elicitores y los avances en la tecnología y la investigación es probable que se vea una mayor aplicación de estos en la agricultura: como la presión de los patógenos y los efectos del cambio climático en los próximos años. En resumen, los elicitores representan una prometedora herramienta biotecnológica para mejorar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria en un contexto de cambio climático y demandas crecientes de alimentos.

Referencias

- Abdul Malik, N. A., Kumar, I. S., & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International journal of molecular sciences*, 21(3), 963. <https://doi.org/10.3390/ijms21030963>
- Anna Todd, J. N., Gisel Carreón-Anguiano, K., Jhosimar Couoh-Dzul, O., de los Santos-Briones, C., & Canto-Canché, B. (2023). Effectors: key actors in phytopathology. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(2), 203-228. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2210-4>
- Caicedo-López, L. H., Aranda, A. L., Sáenz de la O, D., Gómez, C. E., Márquez, E. E., & Zepeda, H. R. (2021). Elicitores: implicaciones bioéticas para la



- agricultura y la salud humana. *Revista Bioética*, 29(1), 76-86. <https://doi.org/10.1590/1983-80422021291448>
- Ceulemans, E., Ibrahim, H. M. M., De Coninck, B., & Goossens, A. (2021). Pathogen Effectors: Exploiting the Promiscuity of Plant Signaling Hubs. *Trends in plant science*, 26(8), 780–795. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.01.005>
- González, R. G. G., Aranda, A. L. V., Jiménez, N. I. F., & Roséndiz, M. M. (2020). *Elicidores en la agricultura. Bases teóricas y algunas aplicaciones* (Vol. 2). Editorial Universidad Almería.
- Humbal, A. & Pathak, B. (2022). Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: a review (VSI: Secondary Metabolites). *Plant Stress*, 8. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4290260>
- Kumar, A., Bilal, M., Santoyo, G., & Singh, J. (eds.). (2024). *Biocontrol Agents for Improved Agriculture*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-01735-9>
- Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmael, Q., El Hamss, H., Belabess, Z., & Barka, E.A. (2022). Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. *Microorganisms*, 10(3), 596. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>
- Singh, B., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J., Liu, H. & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 640–656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Zehra, A., Raytekar, N. A., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: A review. *Current research in microbial sciences*, 2, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100054>



El mundo invisible bajo nosotros para el desarrollo de bioherbicidas

González-López, Angela Michelle¹, Rincón-Enríquez, Gabriel¹, Quiñones-Aguilar, Evangelina Esmeralda^{1*}

¹Laboratorio de Fitopatología-Unidad de Biotecnología Vegetal-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: equinones@ciatej.mx

Palabras clave:

actinobacterias, herbicida, malezas, malas hierbas

Resumen

El objetivo de este escrito es explorar la increíble contribución de las actinobacterias en la biotecnología y su impacto en el ser humano. Se busca destacar la importancia de estos microorganismos en la producción de compuestos bioactivos y su papel en la biotecnología, específicamente su relevancia y potencial futuro en la búsqueda de soluciones innovadoras ante los desafíos de la agricultura, como lo es el control de especies de malezas en los cultivos de importancia en la agricultura.

Introducción

Era una fresca mañana en la polis de Tesalia, donde las molestas malezas crecían sin control en los campos de trigo de la parcela familiar. La cosecha aún estaba lejos, pero eliminar a las *herba inutilis* era crucial para asegurar el alimento de la familia. Nicos, el patriarca, se preparaba para iniciar el exterminio de las plantas indeseables con la ayuda de su familia.

Todos comenzaron la eliminación usando herramientas para cortar y arrancar las malezas de raíz. Según las obras botánicas de Teofrasto y Plino el viejo, en la antigua Grecia los agricultores utilizaban la amurca (residuos de la producción de aceite de oliva), agua salada y flores de lupino sumergidas en jugo de cicuta para disminuir la aparición de malezas. Sin embargo, estos conocimientos biotecnológicos se perdieron durante los siguientes 800 años.

La lucha contra las malezas ha sido una constante a lo largo de los siglos y perdura hasta nuestros días, mientras buscamos soluciones seguras y efectivas para su control en los campos.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
173 -181. ISSN: 3061-709X.
[https://doi.org/10.5281/
zenodo.12773760](https://doi.org/10.5281/zenodo.12773760)

Recibido: 22 abril 2024
Revisado: 7 de mayo 2024
Aceptado: 03 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Las malezas, las rebeldes verdes de la agricultura

No existe una definición exclusiva para el término “maleza”, pero, en general, se refiere a aquellas plantas que causan pérdidas económicas o daños ecológicos y afectan a humanos o animales. Es importante destacar que la percepción de las malezas puede variar según la comunidad. Por ejemplo, en algunas partes de la zona centro de México plantas como los quelites o amarantos son comestibles, mientras que otras especies son valoradas por sus propiedades medicinales; sin embargo, en otras partes de México estas especies tienen una percepción negativa en la agricultura. Por lo tanto, el concepto de maleza no es estático, sino más bien un constructo social y ético que determina si una planta es deseada o indeseada.

En la agricultura extensiva se realizan esfuerzos titánicos para combatir las malezas en los cultivos. Estas plantas indeseadas son consideradas una de las plagas más importantes, ya que reducen significativamente el rendimiento de los cultivos. Su presencia compite directamente con las plantas cultivadas por nutrientes en el suelo, espacio físico, luz solar y agua, limitando así el crecimiento y desarrollo de la especie cultivada. Erradicar una maleza de un campo de cultivo puede ser una tarea casi imposible. Las malezas se comportan como auténticas “super plantas” debido a su rápido crecimiento y su capacidad para florecer antes que los cultivos (Figura 1). Algunas especies pueden producir semillas de manera ininterrumpida y abundantemente. Un ejemplo de esto es la especie *Amaranthus palmeri*, que puede generar hasta 300 000 semillas por individuo. Además, pueden tolerar una amplia variedad de condiciones ambientales. Estas características únicas otorgan una eficacia biológica mucho mayor que la de sus competidores naturales en el agroecosistema.



Figura 1. Distribución de *Portulaca oleracea* L. (verdolaga) en cultivos de *Agave tequilana* Weber var. Azul bajo manejo orgánico en Amatitán, Jalisco



El glifosato, el herbicida que saltó a la fama... y a todas las malezas

Ahora vamos a hacer un viaje al pasado. En la década de los años 50, el Dr. Henri Martín descubrió la molécula llamada N-(fosfonometil) glicina (Gillam, 2017). Sin embargo, su investigación dio un giro inesperado, Henri perdió súbitamente el interés en esta investigación porque no le encontró un uso farmacéutico, así que decidió venderla a otras compañías. Y así, 30 años después, el Dr. Jhon Franz se encontraba en su laboratorio manipulando químicamente la molécula (Gillam, 2017). ¿Su objetivo? Realizar diferentes versiones de esta con el propósito de encontrar un herbicida lo suficientemente efectivo como para venderlo por todas partes. Justo cuando estaba a punto de dejar el proyecto, la tercera molécula que había creado resultó ser todo un éxito, la nombró “glifosato”. A partir de este redescubrimiento la empresa Monsanto comenzó la fabricación y distribución de su producto estrella: ¡Roundup! Así te presentamos a la molécula que revolucionó al planeta y a la agricultura moderna.

El glifosato comenzó a venderse en gran parte del mundo; sin embargo, dos sucesos provocaron una explosión masiva en su venta. El primero fue la creación de cultivos de maíz, trigo, soya y algodón resistentes al glifosato. ¿Y cómo lograron esto? Manipulando el ADN de las plantas, creando Organismos Genéticamente Modificados (OGM). Esto significaba que los agricultores podían utilizar este herbicida sin preocuparse por dañar sus cultivos.

Pero no todo es miel sobre hojuelas: el dilema entre acabar con las hierbas y mantenernos a salvo

Las personas están expuestas al glifosato a través de los alimentos, el agua potable y el ambiente (Office of Chemical Safety And Pollution Prevention, 2017). Actualmente existe una gran controversia sobre la clasificación del glifosato como agente carcinogénico. En 2015, el Centro Internacional de Estudio sobre el Cáncer (IARC) clasificó a este compuesto como “probable cancerígeno para humanos” colocándolo en el grupo 2A (IARC, 2015). La categoría 2A se utiliza cuando el agente analizado tiene evidencia “limitada” de carcinogenicidad en humanos y evidencia “suficiente” de carcinogenicidad en animales experimentales (IARC, 2015). Algunos estudios han concluido que las personas expuestas al glifosato podrían tener un mayor riesgo de desarrollar “linfoma no Hodgkiniano” (Hardell *et al.*, 2002; De Roos *et al.*, 2003; Schinasi *et al.*, 2014). Sin embargo, uno de los estudios más contundentes para la clasificación otorgada por la IARC es el “Agricultural Health Study (AHS)”. Este estudio determinó que no existe relación entre la exposición a glifosato y el desarrollo de cáncer en humanos (De Roos *et al.*, 2005). No obstante, el estudio publicado por la AHS tuvo un corto periodo de seguimiento, lo que limita la capacidad para detectar una asociación a largo plazo entre el glifosato y la aparición de cáncer (IARC, 2015).



Por otro lado, algunas instituciones y empresas de agroquímicos no coinciden con las clasificaciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, algunas compañías de agroquímicos declararon que las evaluaciones realizadas por la IARC presentaban deficiencias metodológicas. Sin embargo, la IARC defendió su declaración mencionando que la selección de estudios se basa en publicaciones revisadas por pares e informes gubernamentales, excluyendo estudios patrocinados por la industria (Cressey, 2015).

Las conclusiones de las evaluaciones de riesgo del glifosato varían dependiendo de los métodos y criterios utilizados por diferentes organizaciones. Debido a la gran divergencia de opiniones es prudente mantenerse en un enfoque preventivo ante el uso del glifosato.

A raíz de la problemática referente a la seguridad del glifosato, en 28 países está prohibido o restringido el uso de este en los cultivos, entre ellos Austria, Francia, Alemania, Vietnam, Tailandia, India, Canadá, Costa Rica y Colombia (WisnerBaun, 2023). En México se han realizado esfuerzos por prohibir el uso del glifosato, actualmente esto no es posible debido a la falta de alternativas. Además de esto, si hubiera alguna alternativa económicamente viable se requiere que los agricultores conozcan y confíen en el producto, por lo que es necesario un esfuerzo eficiente de extensionismo para lograrlo (Mayorga, 2024).

Las actinobacterias al rescate

Las actinobacterias son organismos microscópicos que se encuentran en muchos ecosistemas, podemos encontrarlos en el suelo, mar, cuevas, lagos, zonas volcánicas o como huéspedes de plantas y animales. ¡Están en casi todas partes! Hoy exploraremos su misterioso mundo (Figura 2). Las actinobacterias son principalmente saprofitas, producen diferentes enzimas que pueden descomponer azúcares complejos como lignocelulosa o quitina (Zoya *et al.*, 2021). Algunos autores mencionan que el suelo es como un contenedor natural de actinobacterias, estos microorganismos son los más abundantes (Takahashi & Omura, 2003). Las actinobacterias aceleran los procesos de reciclaje orgánico en el suelo, son máquinas enzimáticas que mejoran la productividad del suelo mediante la aceleración del ciclo de nutrientes, a través de la descomposición de azúcares complejos (Kennedy *et al.*, 1999). También son increíblemente tolerantes a diferentes condiciones ambientales, desde el calor ardiente de las zonas volcánicas hasta las profundidades misteriosas del océano. Pero lo que las hace aún más sorprendentes es la gran cantidad de moléculas que secretan al medio que las rodea. Estos diminutos seres tienen un arsenal de moléculas que pueden ser clave para enfrentar algunos desafíos en la actualidad. El estudio y el aprovechamiento de estos organismos sería conveniente para la agricultura, ya que en el campo de la medicina los metabolitos secundarios derivados de las actinobacterias son bastante estudiados; sin embargo, se deben de considerar varios aspectos, el primero es conocer el mecanismo de acción

del metabolito ya que es importante asegurar que no generará efectos adversos a la salud humana (Hassan *et al.*, 2016). Otro aspecto importante es su producción, algunas especies de actinobacterias son complicadas de establecer en condiciones de laboratorio, por lo que se deben implementar otras estrategias biotecnológicas para lograr métodos de producción comercialmente viables a largo plazo y rentables (Hassan *et al.*, 2016; Al-shaibani *et al.*, 2021).

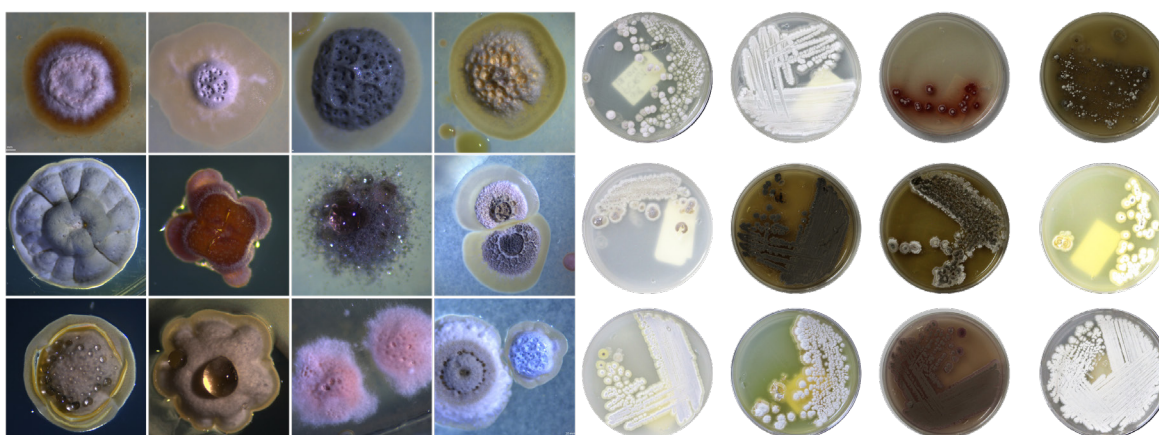


Figura 2. Las actinobacterias son microorganismos que producen diversas moléculas, incluidas enzimas, pigmentos y metabolitos secundarios. Los pigmentos liberados al medio de cultivo facilitan la distinción entre cepas, y las colonias de actinobacterias suelen tener una textura polvosa, lo que las hace únicas.

Se ha descubierto a lo largo de los años que algunas moléculas secretadas por las actinobacterias tienen actividad fitotóxica contra algunas especies de malezas. La fitotoxicidad es el grado de daño que ocasiona un compuesto en el desarrollo de una planta. Los herbicidas, como el glifosato, tienen efecto fitotóxico en las plantas; pueden afectar a cultivos que no sean resistentes a este químico. El efecto fitotóxico es lo que les permite exterminar a las malezas en el campo. Varios investigadores han encontrado especies de actinobacterias, en especial aquellas pertenecientes al género *Streptomyces*, que producen estas moléculas herbicidas. Podemos encontrar una gran variedad de moléculas y mecanismos de acción, algunas moléculas inhiben la síntesis de aminoácidos relevantes en la planta, llevándola a la muerte inminente. Los científicos están explorando y probando estas moléculas en el campo (Shi *et al.*, 2020). Por ejemplo, de las especies *Streptomyces viridichromogenes* y *Streptomyces hygrosco- pus* se obtuvo el metabolito denominado bialafos y la hidrólisis de este compuesto da como resultado una molécula llamada fosfinitricina, la cual inhibe la síntesis de glutamina generando un desequilibrio en el metabolismo primario de la planta (Hoerlein, 1994). También se han detectado dos compuestos herbicidas producidos por la especie *Streptomyces plumbeus* la plumbeicina a y b (Shi *et al.*, 2020).

La resormicina es un péptido producido por *Streptomyces platensis* y del cual se evaluó su actividad inhibidora de la germinación en 15 especies de malezas, obtenien-



do porcentajes de inhibición de entre 39 y 100% a una concentración de 500 ppm (Igarashi *et al.*, 1997). La producción de la resormicina es acelerada, ya que a los dos días de incubación se alcanza un máximo de producción de 100 mg/L; sin embargo, su mecanismo de acción aún no ha sido determinado, esto limita su escalonamiento a un producto comercial. De *Streptomyces scabies* se aisló el péptido taxtomina, el cual mostró actividad herbicida en pre-emergencia y post-emergencia en tres especies de arvenses (King *et al.*, 2001). Este compuesto inhibe la síntesis de celulosa afectando el desarrollo adecuado de la membrana plasmática (Shi *et al.*, 2020) y se patentó para su uso en formulaciones herbicidas en 2010 (Koivunen *et al.*, 2010). Estas investigaciones nos dan alientos prometedores para el desarrollo de herbicidas provenientes de compuestos naturales que sean seguros para el ambiente y para los humanos.

Mientras el glifosato, el antiguo milagro de la revolución verde cae en el centro de un debate polémico, las actinobacterias emergen como alternativa sostenible. Imagina un futuro en donde los herbicidas no sean productos riesgosos y agresivos, sino que estén alineados con la naturaleza. Buscamos que estos productos y su uso respeten el ambiente y a nosotros mismos. Incluso ya están en desarrollo herbicidas realizados con moléculas extraídas de actinobacterias (Leep *et al.*, 2010; Koivunen *et al.*, 2010). Sin embargo, existen ciertas limitantes que nos ponen aún bastante lejos de alcanzar la meta. Una de ellas es que algunas de las moléculas descubiertas hasta ahora pueden ser específicas para ciertos tipos de malezas, lo que limita su espectro de uso. Otra limitante es que además de encontrar una molécula cuya actividad herbicida sea eficiente, y además su producción o síntesis sea rentable, debe de contar con los perfiles toxicológicos necesarios solicitados por las normas oficiales mexicanas, además de las evaluaciones de riesgo ecológico y estrategias de tratamiento del compuesto (Choudri *et al.*, 2020).

Conclusión

Las actinobacterias son una fuente de productos bioactivos que podrían usarse para la creación de bioherbicidas o como base para la síntesis de herbicidas. Sin embargo, se requieren de nuevas tecnologías, como la biología sintética, para aumentar la probabilidad de descubrir este tipo de moléculas (Shi *et al.*, 2020).

Es esencial buscar nuevos mecanismos de acción para superar la resistencia a los herbicidas. Aunque los metabolitos de actinobacterias presentan diversos mecanismos de acción, algunos podrían no ser adecuados si afectan la salud humana o si su producción no es rentable. Sin embargo, es necesario seguir en este camino de exploración para encontrar alternativas y soluciones a los problemas que enfrentamos actualmente como sociedad, siempre de la mano de la ciencia ¡Estamos dando pasos agigantados hacia el futuro!



Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Referencias

- Al-shaibani, M.M., Radin Mohamed, R.M.S., Sidik, N.M., Enshasy, H.A.E., Al-Gheethi, A., Noman, E., Al-Mekhlafi, N.A. & Zin, N.M. (2021). Biodiversity of Secondary Metabolites Compounds Isolated from Phylum Actinobacteria and Its Therapeutic Applications. *Molecules*, 26,4504. <https://doi.org/10.3390/molecules26154504>
- Benbrook, C.M. (2016). Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*, 28(3), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>
- Choudri, B.S., Charabi, Y., Al-Nasiri, N. & Al-Awadhi, T. (2020). Pesticides and herbicides. *Water environment research*, 92,1425-1432. <https://doi.org/10.1002/wer.1380>
- Cressey, D. (2015, 24 de marzo). Widely used herbicide linked to cancer. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/nature.2015.17181>
- De Roos, A.J., Zahm, S.H., Cantor, K.P., Weisenburger, D.D., Holmes, F.F., Burmeister, L.F. & Blair, A. (2003). Integrative assessment of multiple pesticides as risk factors for non-Hodgkin's lymphoma among men. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 60(9), e11. <https://doi.org/10.1136/oem.60.9.e11>.
- De Roos, A.J., Blair, A., Rusiecki, J.A., Hoppin J.A., Svec, M., Dosemeci, M., Sandler, D.P. & Alavanja, M.C. (2005). Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the Agricultural Health Study. *Environmental Health Perspectives*, 113(1), 49-54. <https://doi.org/10.1289/ehp.7340>.
- Gillam, C. (2017). An Award-Winning Discovery. En *Whitewash The Story of a Weed Killer, Cancer, and the Corruption of Science* (pp. 23-41). Island Press. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-833-6>
- Hardell, L., Eriksson, M. & Nordstrom, M. (2002). Exposure to Pesticides as a Risk Factor for Non-Hodgkin's Lymphoma and Hairy Cell Leukemia: Pooled Analysis of Two Swedish Case-control Studies. *Leukemia and Lymphoma*, 43(5), 1043–1049. <https://doi.org/10.1080/10428190290021560>.
- Hoerlein G. (1994). Glufosinate (phosphinothricin), a natural amino acid with unexpected herbicidal properties. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 138, 73–145. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2672-7_4
- Hassan, S.S.U. & Shaikh, A.L. (2017). Marine actinobacteria as a drug treasure house. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 87, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2016.12.086>.



- Igarashi, M., Kinoshita, N., Ikeda, T., Kameda, M., Hamadaand, M., & Takeuchi, T. (1997). Resormycin: a Novel Herbicidal and Antifungal Antibiotic Produced by a Strain of *Streptomyces platensis* I. Taxonomy, Production, Isolation and Biological Properties. *The Journal of antibiotics*, 50(12), 1020–1025. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.50.1020>
- International Agency for Research on Cancer. (2015). *LARC Monographs Volume 112: Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides LARC Monographs Volume 112: evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides*. <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-monographs-volume-112-evaluation-of-five-organophosphateinsecticides-and-herbicides/>
- Kennedy, A. (1999). Bacterial diversity in agroecosystems. En M.G. Paoletti (ed.), *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes* (pp. 65-76). Elsevier <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50007-8>
- King, R.R.; Lawrence, C.H. & Gray, J.A. (2001). Herbicidal properties of the thaxtomin group of phytotoxins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49, 2298–2301. <https://doi.org/10.1021/jf0012998>
- Koivunen, M. & Marrone, P. (2010). *Uses of thaxtomin and thaxtomin compositions as herbicides*. U.S. Patent 20100167930 A1, July 1.
- Leep, D.C., Doricchi, L., Baz, M.J.P., Millan, F.R. & Chimeno, R.I.F. (2010). *Use of thaxtomin for selective control of rice and aquatic based weeds*. WO Patent 2010121079 A2.
- Mayorga, J. (2024). Glifosato en México: ¿por qué el gobierno pospuso su prohibición? *Mongabay*. <https://es.mongabay.com/2024/04/glifosato-mexico-gobierno-pospuso-suprohibicion/#:~:text=Para%20el%20%C3%BAltimo%20d%C3%ADa%20de,31%20de%20enero%20del%202024.>
- Office of Chemical Safety and Pollution Prevention. (2017). *Glyphosate. Dietary exposure analysis in support of registration review*. In: Washington, DC: United States Environmental Protection Agency; p. 1–20. file:///D:/Usuarios/consejoeditorial/Downloads/EPA-HQ-OPP-2009-0361-0071_content.pdf
- Schinasi, L. & Leon, M.E. (2014). Non-Hodgkin Lymphoma and Occupational Exposure to Agricultural Pesticide Chemical Groups and Active Ingredients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(4), 4449-4527. <https://doi.org/10.3390/ijerph110404449>
- Shi, L., Wu, Z., Zhang, Y., Zhang, Z., Fang, W., Wang, Y., Wan Z., Wang, K. & Ke, S. (2019). Herbicidal Secondary Metabolites from Actinomycetes: Structure Diversity, Modes of Action, and Their Roles in the Development of Herbicides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(1), 17-32. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06126>



- Takahashi, Y. & Omura, S., (2003). Isolation of new actinomycete strains for the screening of new bioactive compounds. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 49(3), 141–154. <https://doi.org/10.2323/jgam.49.141>
- Vibrans, H. (2016). Ethnobotany of Mexican Weeds. En R. Lira, A. Casas & J. Blancas (eds), *Ethnobotany of Mexico* (pp. 287-317). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_12
- WisnerBaun. (2023 mayo). Where is glyphosate banned? *WisnerBaun*. <https://www.wisnerbaum.com/toxic-tort-law/monsanto-roundup-lawsuit/where-is-glyphosate-banned-/>
- Zoya, J., Tripathi, G.D., Mishra, M. & Dashora, K. (2021). Actinomycetes – The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101893. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893>



Subproductos del cultivo de yaca en México: fuente de metabolitos secundarios y proteína

Carolina Calderón-Chiu¹, Montserrat Calderón-Santoyo¹, Juan Arturo Ragazzo-Sánchez^{1*}

¹Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Tepic, Nayarit, México.

*Autor de correspondencia: jragazzo@tepic.tecnm.mx

Resumen

Palabras clave:

biomasa verde, hidrolizados proteicos, emulsionante, antifúngico, látex, poliisoprenoides

Garantizar el suministro de proteínas y otros compuestos funcionales es un reto que enfrenta el mundo en la actualidad. Los subproductos agroindustriales son una fuente potencial, económica y sostenible para obtenerlos. Subproductos agroindustriales del cultivo de yaca en México, como la biomasa verde (hojas verdes) y látex, han mostrado ser fuente factible para obtener metabolitos secundarios, proteínas y poliisoprenoides. A pesar de ello, estos residuos han sido poco estudiados en comparación con los subproductos convencionales del cultivo, como la cáscara, semilla o perianto. Por tal motivo, este artículo describe los hallazgos de los últimos años, relacionados con el procesamiento y transformación de la biomasa verde y látex de yaca en México. Enfatizando que su utilización es viable y esencial, ya que gestiona estratégicamente los residuos y la economía circular al transformarlos en metabolitos secundarios, proteínas/péptidos o poliisoprenoides con valor industrial como antimicrobianos, emulsionantes o materiales poliméricos alternativos, respectivamente.

Introducción

El aumento de la población ha incrementado las actividades agrícolas para satisfacer la demanda de alimentos, lo que provoca una importante generación de residuos durante la cosecha, almacenamiento y distribución. Estos a menudo se consideran desechos por la percepción de poca viabilidad económica, causando contaminación ambiental y riesgos a la salud si no se manejan adecuadamente (Rohatgi *et al.*, 2023). Sin embargo, se ha reportado que estos subproductos agrícolas albergan diversos compuestos potencialmente valiosos en diversas industrias. Por tanto, la obtención de compuestos a partir de subproductos agrícolas no

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
183-196. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12773852>

Recibido: 13 abril 2024
Revisado: 20 de mayo 2024
Aceptado: 02 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



sólo promueve la gestión de los desechos, sino que hace uso de técnicas ingenieriles innovadoras para convertirlos sosteniblemente en productos con valor económico para los productores (Rohatgi *et al.*, 2023; Phiri *et al.*, 2024). Esta gestión estratégica de los subproductos podría sustituir con éxito a los métodos convencionales de eliminación de residuos agroindustriales en vertederos. Asimismo, conduce a una nueva era de mercado verde y fomenta el crecimiento de la economía circular al reducir el desperdicio de alimentos (Bhatia *et al.*, 2023; Rohatgi *et al.*, 2023).

En México diversos grupos de investigación se enfocan en el aprovechamiento de los subproductos de distintos cultivos de importancia económica. En el cultivo de yaca o jaca (*Artocarpus heterophyllus* L.) se ha reportado que el 70% del fruto corresponde a cáscara, semillas y perianto, subproductos que se generan durante el procesamiento (Sarangi *et al.*, 2023). Otros subproductos derivados de este cultivo son la biomasa verde (hojas verdes) y látex, a los cuales se les ha dado poca atención, pero tienen potencial para la obtención de compuestos de alto valor biológico (CAVB) con actividad antimicrobiana y proteínas con actividad emulsionante o espumante. En 2019, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reportó la producción de 26 641.38 t de yaca a nivel nacional, producción que incrementó a 36 717.38 t en 2022. Esto indicaría que el cultivo de yaca en México se está extendiendo y que la biomasa verde y el látex de este cultivo podrían ser una fuente sostenible para obtener componentes con aplicación en la industria alimentaria. Se ha reportado que la biomasa verde es rica en compuestos fenólicos, flavonoides y taninos con actividad antifúngica, así como proteínas que pueden ser utilizadas como estabilizadores de nanoemulsiones aceite en agua (O/W). Por su parte, el látex es fuente de poliisoprenoides con potencial en la nanoencapsulación de moléculas bioactivas. Por tal motivo, el objetivo de este artículo es describir las investigaciones realizadas con la biomasa verde y el látex procedente del cultivo de yaca en México y las posibles aplicaciones en el área alimentaria.

Cultivo de yaca en México

La yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) es una fruta tropical que, debido a su adaptabilidad, sabor único y valor nutricional, se cultiva en regiones tropicales y subtropicales del mundo como India, Malasia, África central, el Caribe, Brasil, Puerto Rico, muchas islas del Pacífico y México. La yaca fue introducida en México hace más de 20 años en San Blas, Nayarit, como cultivo alternativo al plátano (Luna-Esquivel *et al.*, 2013), pero se ha extendido a otros estados de la república como Veracruz, Jalisco, Hidalgo, Colima y Michoacán gracias a su importancia económica (SIAP, 2022). Nayarit es el principal productor de yaca a nivel nacional, con la mayor superficie sembrada y cosechada en 2022 y alto valor de producción en pesos (Tabla 1). Este estado cuenta con varios genotipos de yaca, entre ellos destacan la "Agüitada", "Romina", "Jaiba", "Licenciada" y "Karlita".



Tabla 1. Producción Agrícola de yaca en México (t) en 2022

Entidad	Superficie (ha)		Producción (t)	Valor Producción (miles de Pesos)
	Sembrada	Cosechada		
1 Nayarit	1,632.95	1,333.95	34,843.83	440,731.51
2 Veracruz	70	69	1,235.41	10,981.79
3 Jalisco	37	37	527.57	2,438.39
4 Hidalgo	5.5	5.5	28.05	533.09
5 Colima	6.75	6.75	63.9	487.22
6 Michoacán	2	2	18.62	141.11
Total	1,754.20	1,454.20	36,717.38	455,313.11

Fuente: SIAP (2022).

La mayor parte de la producción de yaca se destina a la exportación a EUA en forma fresca o mínimamente procesada (Ruiz-Montañez *et al.*, 2017). Su gran demanda está influenciada por la presencia de flavonoides, fenoles y carotenoides, vitaminas, minerales, carbohidratos, ácidos grasos y ésteres volátiles. Por su alto contenido en CAVB, su consumo se ha asociado con beneficios a la salud como potente antioxidante, antiinflamatorio anticancerígeno y antimutagénico (Ruiz-Montañez *et al.*, 2017). Por esto, existen muchas investigaciones enfocadas en el fruto, entre ellas se incluye la determinación del potencial aromático de diversos cultivares (Barros-Castillo *et al.* 2021; Barros-Castillo *et al.* 2023) y la obtención de néctar (Cruz-Cansino *et al.*, 2021) y de extractos con actividad anticancerígena y antioxidante (Ruiz-Montañez *et al.*, 2019). La semilla, otro subproducto de este cultivo, también ha sido estudiada para la extracción de almidón, proteína (Resendiz-Vazquez *et al.*, 2017) y harina (Ortega-González *et al.*, 2022). No obstante, estos no son los únicos subproductos generados en este cultivo. De hecho, investigadores del Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, perteneciente al Instituto Tecnológico de Tepic y liderados por el Dr. Juan Arturo Ragazzo-Sánchez, han demostrado que la biomasa verde y el látex de este cultivo son una fuente de proteína y CAVB con diversas propiedades de interés en la industria de alimentos, cosmética y farmacéutica.

Biomasa verde del cultivo de yaca

La biomasa verde incluye a la alfalfa, hojas de cultivos agroindustriales y de árboles. De ellas, las hojas de cultivos son consideradas una fuente para la extracción de CAVB. Su importancia radica en que derivan de desechos agrícolas, puesto que en muchos cultivos industrializados sólo partes específicas de las plantas (raíz, flores y frutas) se cosechan y procesan, mientras que las hojas, que representan numerosas toneladas de biomasa verde por año, no se utilizan y son consideradas subproductos (Tenorio *et al.*, 2018). El árbol de la yaca en México es una fuente importante de biomasa verde (Figura 1).



Figura 1. Biomasa verde del cultivo de yaca después de la poda del árbol en el huerto “Tierras Grandes”, Zacualpan, Compostela, Nayarit, México. **Fuente:** Propia

En este cultivo se realizan podas bianuales a los árboles con la finalidad de evitar el crecimiento excesivo del árbol, esto favorece el desarrollo y recolección del fruto. La primera poda se realiza en el mes de marzo; la segunda, en agosto-septiembre. En el mejor de los casos, esta biomasa es utilizada como forraje para ganado, pero muchas veces simplemente es desechada. Se han estimado aproximadamente 10 377.76 t/ha de hoja al año (Calderón-Chiu *et al.*, 2021b), por lo se considera una fuente importante de CAVB o polímeros de interés para la industria alimentaria.

Compuestos de alto valor biológicos de la biomasa verde del cultivo de yaca

Fenoles, flavonoides y taninos se han identificado en la biomasa verde de yaca, los cuales poseen alta capacidad antioxidante y potencial actividad contra algunos hongos fitopatógenos. Con relación a esto, Vázquez-González *et al.* (2020) obtuvieron extractos de la biomasa de yaca por diferentes métodos emergentes, tales como microondas (MAE), alta presión hidrostática (HHP) y ultrasonido (EAU). La cantidad y calidad de CAVB en los extractos dependieron del método de extracción e influyeron en las propiedades antifúngicas. El extracto MAE mostró la presencia de Kaempferol 3-O- β -D-apiofuranósilo, ácido cítrico, ácido quínico, ácido 3,5-dicafeoilquínico, carvacrol y epigalocatequina. Por su parte, en el extracto EAU se identificó al ácido cafeico, hidroxitirosol-hexosa e isorhamnetin-3-O-rutinósido. Por último, el extracto obtenido por HHP mostró la presencia del ácido 3,5-dicafeoilquínico. El extracto obtenido por MAE y HHP mostraron inhibición del

crecimiento micelial contra *Penicillium italicum* y *Colletotrichum gloeosporioides* de 40.35 y 55.41%, respectivamente, a una concentración de 5 mg/mL. Esta inhibición fue atribuida a los CAVB en los extractos.

En relación aCon relación a esto, Vázquez-González *et al.* (2020) determinaron la actividad antifúngica de extractos de hoja de yaca contra *Colletotrichum gloeosporioides* y *Penicillium italicum*. Los extractos fueron obtenidosse obuvieron por diferentes métodos emergentes, tales como microondas (MAE), alta presión hidrostática (HHP) y ultrasonido (EAU). La cantidad y calidad de CAVB en los extractos dependieron del método de extracción e influyeron en las propiedades antifúngicas. El extracto MAE mostró la presencia de Kaempferol 3-O- β -D-apiofuranósilo, ácido cítrico, ácido quínico, ácido 3,5-dicafeoilquínico, carvacrol y epigalocatequina. Por su parte, en el extracto EAU se identificó al ácido cafeico, hidroxitirosol-hexosa e isorhamnetin-3-O-rutinósido. Por último, el extracto obtenido por HHP mostró la presencia del ácido 3,5-dicafeoilquínico. El extracto obtenido por MAE y HHP mostraron inhibición del crecimiento micelial contra *P. italicum* y *C. gloeosporioides* de 40.35 y 55.41%, respectivamente, a una concentración de 5 mg/mL. Esta inhibición fue atribuida a los CAVB en los extractos.

Por su parte, Aguilar-Veloz *et al.* (2022) evaluaron el extracto de hoja de yaca obtenido por MAE contra cepas de *Alternaria* spp. Este extracto causó 39.9 % de inhibición del crecimiento micelial (1 mg/mL) debido a la presencia de catequina, epicatequina, cartamidina, isoschaftósido y quercetina. Posteriormente, estos investigadores adicionaron extracto de hoja (5 mg/mL) a recubrimientos a base de pectina de bajo metoxilo y la aplicaron en tratamientos preventivos in vivo en el fruto de tomate. Adicionar extracto al recubrimiento disminuyó significativamente el 50% de la severidad de la infección contra *Alternaria* spp.

Recientemente, Ayón-Macías *et al.* (2024) informaron que el extracto de hoja de yaca también inhibió el crecimiento micelial *in vitro* de *Cladosporium tenuissimum* y *Aspergillus sydowii* (5 mg/mL) con valores de inhibición de 88.2 y 99.3%, respectivamente. Consecutivamente, elaboraron por electrospinning, una tecnología que utiliza un campo eléctrico para la producción de fibras finas, un recubrimiento antifúngico a base de nanofibras de zeína y extracto de hoja. El recubrimiento fue evaluado *in vivo* en *Averrhoa carambola* L. como tratamiento preventivo y curativo, siendo más efectivo para tratamientos preventivos, pues mostraron 0% de severidad e incidencia para *C. tenuissimum*, mientras que para *A. sydowii* la severidad e incidencia fueron de 30 y 25 %, respectivamente.

Los autores resaltaron que la actividad antifúngica varió en función del patógeno evaluado y demostraron que los extractos de la biomasa verde tienen potencial aplicación como antifúngicos. Esto generará alternativas para controlar y disminuir las pérdidas ocasionadas por hongos fitopatógenos en cultivos de importancia eco-



nómica en México, lo cual podría reducir el uso de pesticidas convencionales que tienen un impacto negativo a la salud y al ambiente. Además de CAVB, esta biomasa verde es fuente de proteínas, biomoléculas, hoy muy relevantes para satisfacer la demanda de alimentos.

Proteína vegetal de la biomasa verde del cultivo de yaca

La industria agroalimentaria genera alrededor de 190 millones de toneladas de proteínas animales y vegetales en forma de residuos (Bhatia *et al.*, 2023). En ese sentido, la biomasa verde es considerada una fuente potencial de proteínas con alto valor nutrimental para el consumo humano (Chen & Qiu, 2003). El contenido de proteína en estos subproductos oscila entre 16-29 % (b.s.) y las variaciones dependen del tipo de cultivo, planta, edad, condiciones ambientales y de crecimiento. Hojas de moringa (*Moringa oleífera*), alfalfa (*Medicago sativa*), helecho (*Diplazium esculentum*), berenjena (*Solanum melongena*), calabaza estriada (*Luffa aegyptiaca*) y amaranto (*Amaranthus*) han sido reportadas como fuentes de proteínas y se ha evidenciado que la biomasa verde del cultivo de yaca también es una opción viable para este fin. Por ello, Moreno-Nájera *et al.* (2020) extrajeron proteínas de la biomasa verde de yaca mediante la aplicación de tecnologías emergentes como el ultrasonido, microondas y alta presión hidrostática, determinando que la extracción por altas presiones hidrostáticas produce mayor rendimiento.

Calderón-Chiu *et al.* (2021b) determinaron 24.05 y 65.8% de proteína en la harina de hoja y concentrado proteico (CP) de yaca, respectivamente. Referente a la funcionalidad, la solubilidad del CP era muy baja a pH ácido, lo que resultaba en limitada aplicación en el área alimentaria. Para superar este inconveniente, los investigadores realizaron la hidrólisis enzimática del CP con pepsina (H-Pep) y pancreatina (H-Pan). La solubilidad fue significativamente mejorada después de la hidrólisis enzimática, con valores de 19-41% (H-Pep) y 60-98% (H-Pan) a pHs de 2.0-10.0, este aumento de la solubilidad mejoró las propiedades emulsionantes y espumantes comparado con CP. Asimismo, los hidrolizados exhibieron alta capacidad de eliminación de radicales DPPH+ (72.38% a 0.1 mg/mL) y ABTS+ (98.2% a 0.8 mg/mL) y mostraron aminoácidos esenciales como isoleucina, leucina, treonina, valina y fenilalanina en niveles recomendados para adultos según la OMS/FAO (Calderón-Chiu *et al.*, 2022). Esto sugiere que los hidrolizados podrían usarse para complementar alimentos con deficiencias en estos aminoácidos y que la hidrólisis enzimática es una herramienta útil para mejorar las propiedades de proteínas vegetales con funcionalidad limitada.

Por otro lado, Vera-Salgado *et al.* (2022) obtuvieron CP por el método convencional (maceración) y por ultrasonido, los cuales fueron sometidos a hidrólisis con pancreatina. Los autores indicaron que el método de extracción tuvo un impacto significativo en el proceso de hidrólisis enzimática e influyó en la funcionalidad de

los hidrolizados. La extracción asistida por ultrasonido fue el mejor método para mejorar la calidad, la tecno-funcionalidad y las propiedades antioxidantes del CP en comparación con la maceración.

Hidrolizados de hoja de yaca como emulsionantes

Las propiedades emulsionantes de proteínas vegetales son una de las áreas más abordadas de la investigación actual, ya que se intenta reemplazar el uso de proteínas de origen animal comúnmente son usadas como emulsionantes. Esto se debe a que la producción primaria de estas proteínas se ha asociado con el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad y cambio climático. En ese sentido, el uso de hidrolizados proteicos de yaca es una alternativa para sustituir a las proteínas de origen animal utilizadas en la fabricación de nanoemulsiones aceite en agua (O/W). Dichas nanoemulsiones son de gran importancia en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética para el transporte/solubilización de compuestos lipofílicos con actividad biológica.

Por ello, los hidrolizados proteicos de hoja de yaca fueron empleados para diseñar/formular un sistema de entrega (nanoemulsión) que contenía un extracto lipofílico de hoja de *Coccoloba uvifera* L. Los hidrolizados permitieron la obtención de una nanoemulsión con tamaño de gota entre 330-360 nm, distribución monomodal y relativamente buena eficiencia de carga del extracto (Calderón-Chiu *et al.*, 2021a). Esto demuestra que los hidrolizados proteicos de hoja de yaca son una alternativa viable para estabilizar nanoemulsiones O/W que contengan compuestos lipofílicos.

Péptidos de hoja de yaca con actividad antifúngica

Con la finalidad de expandir la aplicación de proteínas y péptidos de hoja de yaca, Brion-Espinoza *et al.* (2021) adicionaron péptidos de hojas de yaca (obtenidos después de 2 h de hidrólisis del CP con pepsina) a películas de pectina y evaluaron su actividad antifúngica sobre *C. gloeosporioides*, el cual ocasiona pérdidas de hasta 100% de frutas tropicales como aguacate, papaya, mango, entre otras. Los péptidos mostraron la presencia de aminoácidos esenciales como valina, leucina, isoleucina, metionina, treonina y fenilalanina y lograron inhibir 99% del crecimiento micelial y la germinación de esporas de *C. gloeosporioides*. Las películas de pectina con péptidos de hoja (680 µg/mL) inhibieron en 82.3 y 91.6 % el crecimiento micelial y la germinación de esporas de *C. gloeosporioides*, respectivamente. Esto indicó que los péptidos y las películas con péptidos podrían ser una alternativa verde para controlar la antracnosis en frutas tropicales. La evidencia muestra que la biomasa verde es fuente de CAVB, proteínas, hidrolizados y péptidos con viable aplicación en la industria alimentaria. No obstante, de este cultivo también se deriva el látex, otro subproducto poco explorado, pero de interés para procesos de nanoencapsulación por electrospinning.



Látex del cultivo de yaca

Cuando el fruto de la yaca es cosechado se obtienen aproximadamente 35 mL de látex, lo que resulta en aproximadamente 1.4 L/ha de látex (Figura 2) (Ramos-Martínez *et al.*, 2022). Este exudado está compuesto por lípidos, gomas, polisacáridos, proteínas y resina. La resina está constituida por *cis*-1,4-poliisopreno (34.4 %) y *trans*-1,4-poliisopreno (65.6%), los cuales tienen propiedades poliméricas. Por ello, Ramos-Martínez *et al.* (2022) recolectaron por primera vez en México el látex del cultivo de yaca, que después de un proceso de extracción obtuvieron seis extractos, que fueron caracterizados tecno-funcional y térmicamente. De ellos, dos extractos -el EP-1 y EP-6- mostraron alto contenido de compuestos lipofílicos (89%), fracción que contiene poliisoprenos. El extracto EP-1 mostró mejores propiedades emulsionantes y espumantes que el EP-6. El análisis térmico mostró eventos endotérmicos (50-65 °C) asociados a la fusión del concentrado y eventos exotérmicos relacionados con la cristalización de los poliisoprenos. Esto reveló que las condiciones óptimas de manejo de este extracto son temperaturas menores a 65 °C, sugiriendo su uso como aditivos plastificantes. Finalmente, el estudio mostró que ambos extractos tienen aplicación tecnológica. El EP-1 podría ser utilizado en la formulación de emulsiones y el EP-6 como material coadyuvante o encapsulante en procesos electrohidrodinámicos debido a su baja capacidad espumante.



Figura 2. Recolección de látex después de la cosecha del fruto. Huerto “Tierras Grandes”, Zacualpan, Compostela, Nayarit, México. **Fuente:** Propia

Con relación a esto, Ceballos-Vázquez *et al.* (2022) utilizaron el EP-6 solo o combinado con óxido de polietileno (PEO) o pulúlanos como material polimérico para la obtención de nanofibras a través de procesos de electrospinning. Las nanofibras presentaron morfología homogénea y continua, con diámetros que oscilaron entre 200-400 nm con EP-6-pululano y de 100-300 nm con EP-6-PEO. El análisis

térmico evidenció la compatibilidad entre polímeros y el aumento de la estabilidad térmica del EP-6 cuando se mezcla con pululano o PEO. Las nanofibras obtenidas podrían utilizarse para la encapsulación de moléculas bioactivas o en el desarrollo de productos dérmicos.

Biorrefinería de la biomasa verde en el cultivo de yaca

Las preocupaciones ambientales, la escasez de recursos y la demanda de productos renovables y de origen biológico son los impulsores de la biorrefinería. La biorrefinería transforma la biomasa (residuos agrícolas, subproductos forestales o algas) en una gama de productos valiosos (biocombustibles, bioplásticos y biomateriales) que conciben un futuro más verde y sostenible. El uso de subproductos agroindustriales son la base para la obtención de ingredientes en los sectores alimentario y no alimentario (Wagh *et al.*, 2024). En ese contexto, la extracción de CAVB y proteínas de la biomasa verde de yaca podría integrarse al procesamiento en cascada de la biorrefinería (Figura 3), es decir, un proceso secuencial que permita la obtención de diversos productos biológicos.

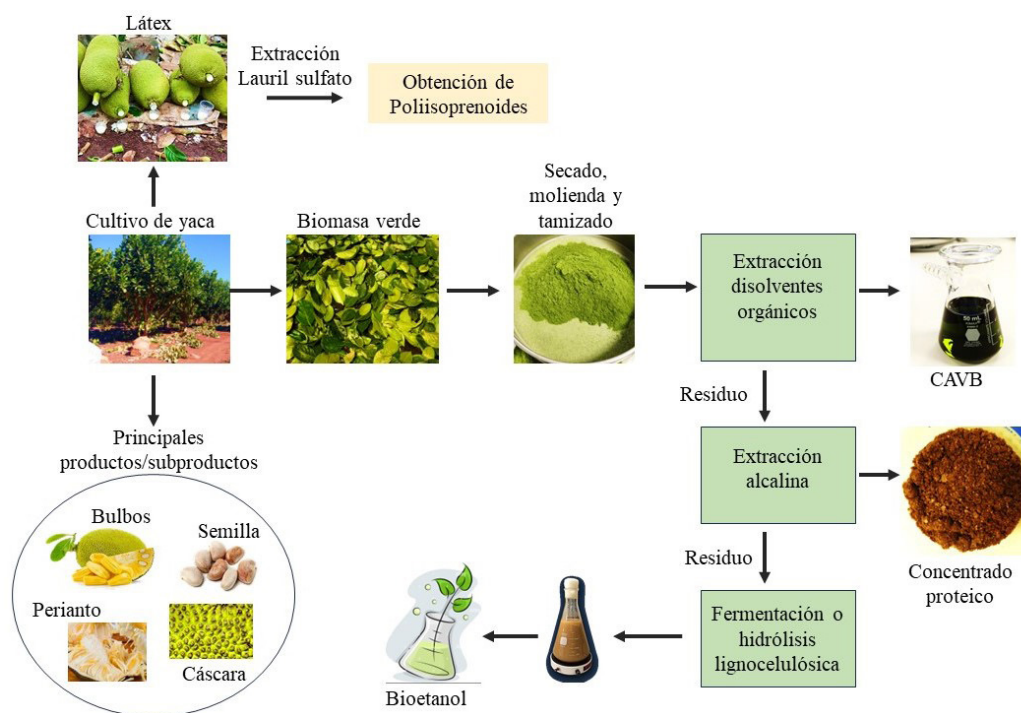


Figura 3. Posible integración del concepto de biorrefinería integral de la hoja de yaca. **Fuente:** Propia.

Un proceso optimizado de la biomasa verde podría partir de la obtención de la harina. A partir de la harina realizar extracciones por métodos emergentes y con disolventes orgánicos para obtener CAVB en el primer paso. Además de obtener CAVB, este proceso servirá como una etapa de purificación al eliminar gran cantidad de pigmentos



que podrían interferir con la extracción de proteínas en la siguiente etapa (Zhang *et al.*, 2015). Consecutivamente, el residuo de la extracción de CAVB se sometería a condiciones alcalinas y métodos de extracción emergentes para obtener proteínas de uso alimentario. En el grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Tepic, hasta el momento, se ha realizado la extracción de CAVB y proteínas de forma secuencial a nivel laboratorio. Sin embargo, el residuo generado de la extracción proteica, constituido principalmente por lignocelulosa, podría ser usado para procesos de hidrólisis con álcalis a temperaturas superiores a 100 °C para liberar monosacáridos y producir bioetanol (Zhang *et al.*, 2015). Para llegar a esto, aún es necesario evaluar la idoneidad y factibilidad de este residuo y continuar con la obtención de bioetanol e integrar todas las etapas de extracción. Además, se requiere encontrar la logística adecuada para la recolección y procesamiento de la biomasa verde con miras a un escalamiento industrial.

Conclusiones

La biomasa verde y el látex son subproductos agroindustriales del cultivo de yaca muy poco explorados. Sin embargo, la caracterización de estos a través de tecnologías emergentes ha demostrado su viabilidad para obtener de forma sostenible CAVB, proteínas, péptidos y poliisoprenoides con gran aplicabilidad en la industria alimentaria, ya sea en forma de emulsionantes, antioxidantes, antimicrobianos o materiales poliméricos. Hasta ahora los estudios realizados indican claramente el potencial de todos los compuestos derivados de estos subproductos. Esto contribuye a que económicamente sean más atractivos para los productores, al mismo tiempo fomenta la gestión de residuos agroindustriales y la economía circular. Sin duda alguna, aún se pueden explorar otras propiedades de los compuestos encontrados hasta ahora con la finalidad de ampliar su aplicación. Sin embargo, los hallazgos podrían sentar la base para realizar el aprovechamiento integral de subproductos en otros cultivos de importancia económica en México.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Investigaciones realizadas en el Instituto Tecnológico de Tepic referente a la biomasa verde del cultivo de yaca mencionadas en este artículo fueron financiadas por la red temática CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) con código 319RT0576.



Agradecimientos

Los autores agradecen a los propietarios del huerto “Tierras Grandes” ubicado en Zacualpan, Compostela, Nayarit, México por la información proporcionada sobre el cultivo de yaca y por ayudar en el proceso de recolección de hojas y látex.

Referencias

- Aguilar-Veloz, L. M., Calderón-Santoyo, M., Carvajal-Millan, E., Martínez-Robinson, K., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Artocarpus heterophyllus Lam. leaf extracts added to pectin-based edible coating for *Alternaria* sp. control in tomato. *LWT*, 156, 113022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113022>
- Ayón-Macías, K. D., Castañeda-Andrade, A. J., Ragazzo-Sánchez, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2024). Application of nanofibers with jackfruit leaf extract via electrospinning to control phytopathogens in *Averrhoa carambola* L. *Polymer Bulletin*, 81(3), 2601–2626. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04815-4>
- Barros-Castillo, J. C., Calderón-Santoyo, M., Cuevas-Glory, L. F., Pino, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021). Volatile profiles of five jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) cultivars grown in the Mexican Pacific area. *Food Research International*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109961>
- Barros-Castillo, J. C., Calderón-Santoyo, M., Cuevas-Glory, L. F., Calderón-Chiu, C., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2023). Contribution of glycosidically bound compounds to aroma potential of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). *Flavour and Fragrance Journal*, 38(3), 193–203. <https://doi.org/10.1002/ffj.3730>
- Bhatia, L., Jha, H., Sarkar, T., & Sarangi, P. K. (2023). Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2318. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032318>
- Brion-Espinoza, I. A., Iñiguez-Moreno, M., Ragazzo-Sánchez, J. A., Barros-Castillo, J. C., Calderón-Chiu, C., & Calderón-Santoyo, M. (2021). Edible pectin film added with peptides from jackfruit leaves obtained by high-hydrostatic pressure and pepsin hydrolysis. *Food Chemistry: X*, 12, 100170. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100170>
- Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., Díaz, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Structural modification of Jackfruit Leaf protein concentrate by enzymatic hydrolysis and their effect on the emulsifier properties. *Colloids and Interfaces*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/colloids6040052>
- Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Damasceno-Gomes, S., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021a). Use of jackfruit leaf (*Artocarpus heterophyllus* L.) protein hydrolysates as a stabilizer of the nanoemulsions loaded with extract-rich in



- pentacyclic triterpenes obtained from *Coccoloba uvifera* L. leaf. *Food Chemistry: X*, 12, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100138>
- Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021b). Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam) leaf as a new source to obtain protein hydrolysates: Physicochemical characterization, techno-functional properties and antioxidant capacity. *Food Hydrocolloids*, 112, 106319. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106319>
- Ceballos-Vázquez, D. M., Calderón-Santoyo, M., González-Cruz, E. M., Prieto, C., Lagarón, J. M., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Fibers with polyisoprenes from Jackfruit latex (*Artocarpus heterophyllus* L.) by electrohydrodynamic processes: Fabrication and characterization. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 14(3), <https://doi.org/https://10.33263/BRIAC143.057>
- Chen, W., & Qiu, Y. (2003). Leaf protein's utilization status and its prospect. *Food Science (Chinese)*, 24(2), 158–161. <https://www.spkx.net.cn/EN/>
- Cruz-Cansino, N. del S., Ariza-Ortega, J. A., Alanís-García, E., Ramírez-Moreno, E., Velázquez-Estrada, R. M., Zafra-Rojas, Q. Y., Cervantes-Elizarrarás, A., Suárez-Jacobo, Á., & Delgado-Olivares, L. (2021). Optimal thermoultrasound processing of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) nectar: Physicochemical characteristics, antioxidant properties, microbial quality, and fatty acid profile comparison with pasteurized nectar. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15029>
- Luna-Esquivel, G., Alejo-Santiago, G., Ramirez-Guerrero, L. G., & Arevalo-Gallarza, M. D. L. (2013). La yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.): Un fruto de exportación. *AgroProductividad*, 6(5), 65–70. <https://doi.org/http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/784>
- Moreno-Nájera, L. C., Ragazzo-Sánchez, J. A., Gastón-Peña, C. R., & Calderón-Santoyo, M. (2020). Green technologies for the extraction of proteins from jackfruit leaves (*Artocarpus heterophyllus* Lam). *Food Science and Biotechnology*, 29(12), 1675–1684. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00825-4>
- Ortega-González, L., Güemes-Vera, N., Piloni-Martini, J., Quintero-Lira, A., & Soto-Simental, S. (2022). Substitution of wheat flour by jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* lam.) seed flour: Effects on dough rheology and deep-frying doughnuts texture and sensory analysis. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30, 100612. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100612>
- Phiri, R., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Agro-waste for renewable and sustainable green production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139989>

- Ramos-Martínez, O., González-Cruz, E. M., Calderón-Santoyo, M., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Polyisoprenes obtained from jackfruit latex (*Artocarpus heterophyllus* L.): Extraction and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(25). <https://doi.org/10.1002/app.52392>
- Resendiz-Vazquez, J. A., Ulloa, J. A., Urías-Silvas, J. E., Bautista-Rosales, P. U., Ramírez-Ramírez, J. C., Rosas-Ulloa, P., & González-Torres, L. (2017). Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.042>
- Rohatgi, V., Challagulla, N. V., & Kumar, R. (2023). Sustainable conversion of agricultural waste to energy and high-value chemicals. En C. Mustansar Hussain, R. Naresh Bharagava, A. Kushwaha, & L. Goswami (eds.), *Bio-Based Materials and Waste for Energy Generation and Resource Management* (pp. 103–142). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91149-8.00007-7>
- Ruiz-Montañez, G., Calderón-Santoyo, M., Chevalier-Lucia, D., Picart-Palmade, L., Jimenez-Sánchez, D. E., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2019). Ultrasound-assisted microencapsulation of jackfruit extract in eco-friendly powder particles: characterization and antiproliferative activity. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(10), 1507–1515. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1566923>
- Ruiz-Montañez, G., Ragazzo-Sanchez, J. A., Picart-Palmade, L., Calderón-Santoyo, M., & Chevalier-Lucia, D. (2017). Optimization of nanoemulsions processed by high-pressure homogenization to protect a bioactive extract of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 40, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.020>
- Sarang, P. K., Srivastava, R. K., Singh, A. K., Sahoo, U. K., Prus, P., & Dziekański, P. (2023). The utilization of Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) waste towards sustainable energy and biochemicals: The attainment of zero-waste technologies. *Sustainability*, 15(16), 12520. <https://doi.org/10.3390/su151612520>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> Date Accessed:2024-03-08
- Tenorio, A. T., Kyriakopoulou, K. E., Suarez-Garcia, E., van den Berg, C., & van der Goot, A. J. (2018). Understanding differences in protein fractionation from conventional crops, and herbaceous and aquatic biomass - Consequences for industrial use. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.010>
- Vázquez-González, Y., Ragazzo-Sánchez, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2020). Characterization and antifungal activity of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*



- Lam.) leaf extract obtained using conventional and emerging technologies. *Food Chemistry*, 330, 127211. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127211>
- Vera-Salgado, J., Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., López-García, U. M., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction of *Artocarpus heterophyllus* L. Leaf Protein Concentrate: Solubility, Foaming, Emulsifying, and Antioxidant Properties of Protein Hydrolysates. *Colloids and Interfaces*, 6(4), 50. <https://doi.org/10.3390/colloids6040050>
- Wagh, M. S., S, S., Nath, P. C., Chakraborty, A., Amrit, R., Mishra, B., Mishra, A. K., & Mohanta, Y. K. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 708–725. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055>
- Zhang, C., Sanders, J. P. M., Xiao, T. T., & Bruins, M. E. (2015). How does alkali aid protein extraction in green tea leaf residue: A basis for integrated biorefinery of leaves. *PLoS ONE*, 10(7), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133046>

Bacterias fijadoras de nitrógeno y *Trichoderma* en el crecimiento de las leguminosas *Mucuna pruriens* y *Phaseolus vulgaris*

Fernanda Chavarín-Flores^{1‡}, Andrés de Jesús López-Gervacio^{2‡}, Jhony Navat Enríquez-Vara^{3*}, Elba Montserrat Alcázar-Valle⁴, Soledad García-Morales^{3*}

¹Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Universidad Jesuita de Guadalajara, Tlaquepaque, México.

²Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México

³Biotecnología Vegetal, CONAHCYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México.

⁴Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México.

‡Estos autores contribuyeron de igual manera en el artículo.

Autores de correspondencia: jenriquez@ciatej.mx y smorales@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

Azotobacter, biofertilizantes, promotor del crecimiento, *Rhizobium*, *Trichoderma*

El uso excesivo de fertilizantes sintéticos y agroquímicos causa efectos dañinos para el medio ambiente, la salud de los agricultores y los consumidores. Las bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos promotores de crecimiento son una de las alternativas al uso de fertilizantes sintéticos. El objetivo fue evaluar el efecto de los biofertilizantes comerciales a base de *Rhizobium* y *Azotobacter*, así como el hongo *Trichoderma asperellum* en plantas de *Mucuna pruriens* y *Phaseolus vulgaris* para potencializar su crecimiento vegetativo. Se usaron dos productos comerciales, uno con *Rhizobium etli* y el otro con *Azotobacter* sp.; además de una cepa de *T. asperellum*. Se encontró un aumento significativo en índice de clorofila y peso fresco de raíz de *P. vulgaris* con ambas bacterias y un mayor número de hojas en plantas de *M. pruriens* con la aplicación de los dos insumos bacterianos. Con *T. asperellum* se obtuvo mayor índice de clorofila, altura y peso del vástago de *M. pruriens*; sin efectos significativos con la inoculación del hongo en el crecimiento de *P. vulgaris*. Los bioinsumos que contienen microorganismos benéficos pueden ser una alternativa para potencializar el crecimiento vegetativo de leguminosas; dependiendo del género vegetal y del microorganismo aplicado como biofertilizante.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
197-214. ISSN: 3061-709X.
[https://doi.org/10.5281/
zenodo.12773946](https://doi.org/10.5281/zenodo.12773946)

Recibido: 03 junio 2024
Revisado: 20 de junio 2024
Aceptado: 10 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

El frijol forma parte de la familia de las leguminosas y es una semilla fundamental en la dieta de la población en México debido a su valor nutricional. Este grano tiene un contenido elevado de vitaminas, minerales, fibra y proteína que oscila entre el 20 y 25% (Alcázar-Valle *et al.*, 2021). El consumo de frijol puede beneficiar las condiciones cardiovasculares, así como problemáticas relacionadas con la obesidad, hipertensión y diabetes (Rochín-Medina *et al.*, 2021). El frijol es originario de América, su cultivo y domesticación se registraron en Mesoamérica y los Andes, según revelan estudios y hallazgos arqueológicos encontrados en estas regiones (León-Rojas *et al.*, 2020).

Una de las especies de frijol más utilizadas en la alimentación es *Phaseolus vulgaris* L., que se conoce como frijol común. México es conocido por sus aportaciones a la domesticación del frijol y a la diversidad de especies que alberga; se calcula que existen 70 variedades criollas y una gran diversidad de frijoles silvestres (León-Rojas *et al.*, 2020).

El género *Mucuna* pertenece a la familia Fabaceae e incluye aproximadamente a 150 especies de leguminosas anuales y perennes (Lampariello *et al.*, 2012). *Mucuna pruriens* (L.) DC está considerada entre las leguminosas silvestres infrautilizadas y se puede encontrar en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Esta leguminosa es viable como alimento por su contenido de proteínas (23-35%) y su digestibilidad, que es comparable al de otras legumbres como la soya, las alubias y las habas (Lampariello *et al.*, 2012). Además, esta planta contiene una diversidad de metabolitos y uno de estos es la levodopa que potencialmente puede utilizarse en terapias coadyuvantes en pacientes con la enfermedad de Parkinson (Botello-Villagrana & Martínez-Ramírez 2021).

La eficiencia en la producción de leguminosas puede ser afectada por las condiciones climáticas, la presencia de enfermedades y las condiciones del suelo, donde el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son considerados nutrimentos fundamentales para el cultivo (Medina-García *et al.*, 2016). Es frecuente encontrar deficiencias de N asociadas a la acidificación de los suelos lo que afecta su disponibilidad. Como las plantas carecen del mecanismo asociado con la fijación biológica del N, no son capaces de absorber el N atmosférico (N₂) (González *et al.*, 2012).

Para remediar las deficiencias de N en el suelo, se suelen suministrar fertilizantes nitrogenados; sin embargo, el exceso de nitrógeno no sólo puede ocasionar rendimientos bajos y un precio elevado de producción, sino que también generan contaminación en los cuerpos de agua por la lixiviación que se produce del amoníaco (NH₃). Además, se generan gases de efecto invernadero cuando el nitrato (NO₃⁻) se desnitrifica (Liu *et al.*, 2020). Por lo tanto, se ha propuesto utilizar microorganismos como algunas bacterias simbiotas que poseen el mecanismo de fijación biológica

de N y pueden transformar el N_2 para convertirlo en N soluble que puede ser absorbido por las plantas para su metabolismo (González *et al.*, 2012).

La simbiosis se establece entre las bacterias fijadoras de N, como *Rhizobium*, y la raíz de la planta para formar estructuras especializadas que reciben el nombre de nódulos. A causa de la simbiosis, el frijol puede crecer en suelos que contienen bajas concentraciones de N sin la necesidad de utilizar fertilizantes sintéticos (Isidra-Arellano & Valdés-López, 2022). Para lograr un mejor crecimiento del frijol, se ha planteado el uso de consorcios microbianos porque podrían ser más económicos y tener una mayor eficiencia en la disponibilidad de nutrientes y protección de las plantas contra factores bióticos y abióticos. Debido al interés en los consorcios, es importante identificar a los microorganismos que los conforman, determinar la dinámica entre los microorganismos y evaluar la calidad y la concentración de los bioinsumos que los contenga para decidir la confiabilidad de su uso (Hernández Melchor *et al.*, 2016).

Otras bacterias fijadoras de N son las especies de *Azotobacter*, estas bacterias son de vida libre, tienen mecanismos no simbióticos de fijación del N atmosférico y son consideradas promotoras de crecimiento de las plantas de importancia agrícola. Se ha demostrado el potencial de *Azotobacter* como biofertilizante para la nutrición de las plantas y la fertilidad biológica de los suelos debido a la fijación del N y la solubilización de fósforo; además de conferir protección contra fitopatógenos y por la biosíntesis de fitohormonas (Aasfar *et al.*, 2021).

Asimismo, existen hongos benéficos que pueden actuar como promotores de crecimiento de plantas. Estos hongos han demostrado que favorecen el crecimiento y confieren tolerancia a la planta frente a condiciones climáticas adversas que pueden ser perjudiciales cuando se aplican a las semillas, al suelo o directamente (Miranda *et al.*, 2022). Entre ellos se ha destacado el género *Trichoderma*, el cual es un hongo que se encuentra en la rizosfera y predomina en suelos agrícolas o bosques. Posee un alto nivel de adaptabilidad en diferentes entornos al crecer como saprófito, no requiere de muchos nutrimentos y crece en un rango de temperatura de 25 a 30 °C (Hernández-Melchor *et al.*, 2019). Se ha reportado que *Trichoderma* puede producir fitohormonas como las auxinas, que favorecen el desarrollo de raíces, y giberelinas, que permiten una mayor germinación y elongación del tallo. Este hongo también posee la capacidad de biogénesis de metabolitos secundarios, micoparasitismo y propiedades antibióticas que aumentan la capacidad de la planta para combatir hongos fitopatógenos (Hernández-Melchor *et al.*, 2019). El hongo produce ácidos orgánicos como ácido glucónico, ácido fumárico y ácido cítrico, lo cual puede disminuir el pH del suelo, por lo que se ha propuesto probar su efecto en diferentes cultivos como tomate, frijol, cebolla, berenjena, entre otras (Rodríguez-García & Vargas-Rojas, 2022).



El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos biofertilizantes comerciales bacterianos a base de *Rhizobium* y *Azotobacter*, así como el hongo *Trichoderma asperellum* sobre el crecimiento vegetativo y fisiología de las leguminosas *M. pruriens* y *P. vulgaris* en invernadero.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron semillas de frijol común criollo (*P. vulgaris*) de testa negra, obtenidas del municipio de Xochistlahuca, Guerrero. Las semillas del frijol *Mucuna* (*M. pruriens*) provienen de Santa Rosa de Lima, Oaxaca.

Preparación de los inóculos

Se utilizaron dos biofertilizantes comerciales de la marca Bio-Organik®, uno de ellos con la bacteria fijadora de nitrógeno *Rhizobium etli* a una concentración de 1.2×10^{11} UFC/dosis, en forma de solución acuosa y en presentación de 1 L. El otro producto con la bacteria *Azotobacter* sp. como ingrediente activo a una concentración de 1.2×10^{11} UFC/dosis, en solución acuosa de 1 L.

Se utilizó el hongo *Trichoderma asperellum*, aislado de raíz de aguacate e identificado previamente por secuenciación con los iniciadores universales ITS1 e ITS4. El hongo se sembró por plaqueo en cajas de Petri con medio PDA, las cajas se incubaron en oscuridad a 25 °C por seis días. Después el hongo se dejó crecer en la incubadora con luz artificial durante tres días para inducir la formación de esporas (color verde característico del hongo). Posteriormente, se agregó 5 mL de agua destilada estéril con Tween 80 (0.05%) para cosechar los conidios mediante el raspado de las cajas de Petri. La concentración de conidios se determinó por medio del conteo en una cámara de Neubauer y se ajustó una concentración 1×10^8 conidios/mL para su aplicación a las plantas.

Establecimiento del experimento y tratamientos

Se establecieron dos ensayos experimentales independientes en un invernadero de cubierta plástica, con una temperatura promedio de 25.7 °C y una humedad relativa promedio de 60%. El primero consistió en aplicar los biofertilizantes comerciales que contenían *Rhizobium* o *Azotobacter*, descritos en la sección anterior, para promover el crecimiento vegetativo de las leguminosas estudiadas. En el segundo experimento se utilizó al hongo *T. asperellum*.

En ambos experimentos se utilizó sustrato comercial Sunshine® Mix #4, que se compone por una mezcla de musgo de turba esfagno canadiense, perlita gruesa, piedra caliza dolomítica, carga de nutrientes iniciales y agente humectante. El sustrato se esterilizó en una autoclave bajo condiciones estándares (121 °C por 15 min).



Se utilizaron charolas germinadoras de polietileno flexible de 38 cavidades. Estas charolas se llenaron con el sustrato estéril y se colocó una semilla de cada leguminosa, previamente seleccionadas, todas las semillas se sembraron a aproximadamente 1.5 cm de profundidad. Las semillas no pasaron por ningún tratamiento de desinfestación debido a que se usaron semillas criollas; considerando que, los campesinos no realizan ningún proceso de desinfestación durante sus prácticas agrícolas y que los resultados obtenidos en este trabajo puedan ser socializados en las regiones donde se obtuvo el material vegetal.

Para el primer ensayo experimental, los tratamientos consistieron en los insumos comerciales: Bio-Organik® con *Rhizobium* y Bio-Organik® con *Azotobacter*. El testigo consistió en riegos con agua destilada. La preparación de los productos se llevó a cabo siguiendo las indicaciones del fabricante, utilizando 1 L de producto por 200 L de agua. Al momento de la siembra se aplicó 5 mL de cada biofertilizante comercial por cavidad de la charola (se colocó una semilla por cavidad). Posteriormente, los tratamientos se aplicaron (5 mL) una vez por semana, durante ocho semanas, hasta la aparición de nódulos.

Para el segundo ensayo experimental, las semillas se colocaron en 300 mL de una suspensión de conidios de *T. asperellum*, a una concentración de 1×10^8 esporas/mL, durante 3 h. Después, las semillas tratadas se sembraron a 1.5 cm de profundidad aproximadamente. La aplicación de tratamientos se realizó una vez por semana, a partir de la siembra, regando con 3 mL de la suspensión de *T. asperellum* por cada planta (una planta por cavidad), durante cinco semanas, hasta observar diferencias en las variables de crecimiento entre el testigo y el tratamiento con *T. asperellum*.

En ambos experimentos se tuvieron duplicados, empleando dos charolas germinadoras por cada tratamiento. En cada charola, se sembraron 18 semillas de *P. vulgaris* y 20 semillas de *M. pruriens*.

Variables evaluadas

Una vez que finalizaron los experimentos (ocho semanas para los biofertilizantes y cinco semanas con el hongo *T. asperellum*), se seleccionaron seis plantas por charola para un total de 12 plantas por tratamiento. Se midió el índice de clorofila de las hojas con el medidor de clorofila SPAD-502 Plus (2900P-C). Se midieron las variables asociadas al crecimiento (número de hojas, altura de vástago, longitud de raíz, peso fresco y seco de raíz, peso fresco y seco del vástago) y se determinó el porcentaje de nodulación de las plantas de frijol *M. pruriens* y *P. vulgaris*.



Análisis estadístico

Para las variables de crecimiento se realizó un ANOVA y una separación de medias de acuerdo con la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia del 95%, se utilizó el programa Minitab 20.

Se realizó un análisis de agrupamiento, empleando una clasificación por grupos de plantas que presentaban atributos o variables similares. Para esta clasificación se realizó una matriz de similitud del tipo Bray-Curtis, con datos previamente transformados por una raíz cuarta. Esta matriz consideró las variables morfológicas y fisiológicas medidas de cada especie por tratamiento al inicio y al final del experimento. A partir de la matriz de similitud Bray-Curtis se realizó un análisis de coordenadas principales (PCO). El PCO se visualizó, en una escala métrica, la distribución espacial de las plantas agrupadas por tratamiento.

Resultados

Efecto de los inoculantes bacterianos en el crecimiento de leguminosas

La aplicación de los biofertilizantes comerciales con las bacterias benéficas *Azotobacter* o *Rhizobium* en plantas de *P. vulgaris* y *M. pruriens* no tuvo efectos significativos en la altura de planta, longitud de la raíz o en la acumulación de biomasa fresca o seca (Tabla 1). Particularmente, en las plantas de *P. vulgaris* se encontró mayor longitud de raíz al aplicar el producto *Rhizobium* comparado con *Azotobacter*. El índice de clorofila también fue menor en las plantas tratadas con *Azotobacter* con respecto al testigo.

Tabla 1. Aplicación de inoculantes comerciales en el crecimiento de plantas de leguminosas

Especie	Tratamiento	Altura de vástago (cm)	Longitud de raíz (cm)	Peso fresco de vástago (g)	Peso seco de vástago (g)	Peso seco de raíz (g)	Índice de clorofila
<i>P. vulgaris</i>	Testigo	23.47 ± 1.86 A	15.72 ± 2.83 AB	1.89 ± 0.30 A	0.40 ± 0.10 A	0.23 ± 0.08 A	34.54 ± 3.47 A
	<i>Azotobacter</i>	22.57 ± 2.51 A	14.70 ± 1.74 B	1.58 ± 0.31 A	0.35 ± 0.13 A	0.23 ± 0.05 A	27.67 ± 3.27 B
	<i>Rhizobium</i>	23.74 ± 1.64 A	17.14 ± 1.88 A	1.68 ± 0.34 A	0.36 ± 0.07 A	0.24 ± 0.05 A	30.98 ± 8.17 AB
<i>M. pruriens</i>	Testigo	32.06 ± 1.79 A	16.54 ± 4.11 A	5.07 ± 0.96 A	1.10 ± 0.26 A	0.29 ± 0.07 A	33.29 ± 4.27 A
	<i>Azotobacter</i>	31.79 ± 1.94 A	15.07 ± 2.47 A	5.26 ± 1.01 A	1.05 ± 0.21 A	0.29 ± 0.06 A	31.20 ± 4.49 A
	<i>Rhizobium</i>	32.23 ± 2.16 A	15.29 ± 1.96 A	5.62 ± 0.93 A	1.21 ± 0.22 A	0.33 ± 0.05 A	33.95 ± 5.02 A

Valores promedio ±SD (desviación estándar), n = 12. Letras diferentes, en cada columna, indican diferencias significativas con base en la prueba LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). Fuente: propia

Las leguminosas evaluadas respondieron de manera diferencial a los inoculantes aplicados, ya que en las plantas de *P. vulgaris* se encontró mayor peso fresco de raíz con *Azotobacter* y *Rhizobium*. Mientras que las plantas de *M. pruriens* no presentaron diferencias significativas con la aplicación de los dos productos comerciales (Figura 1).

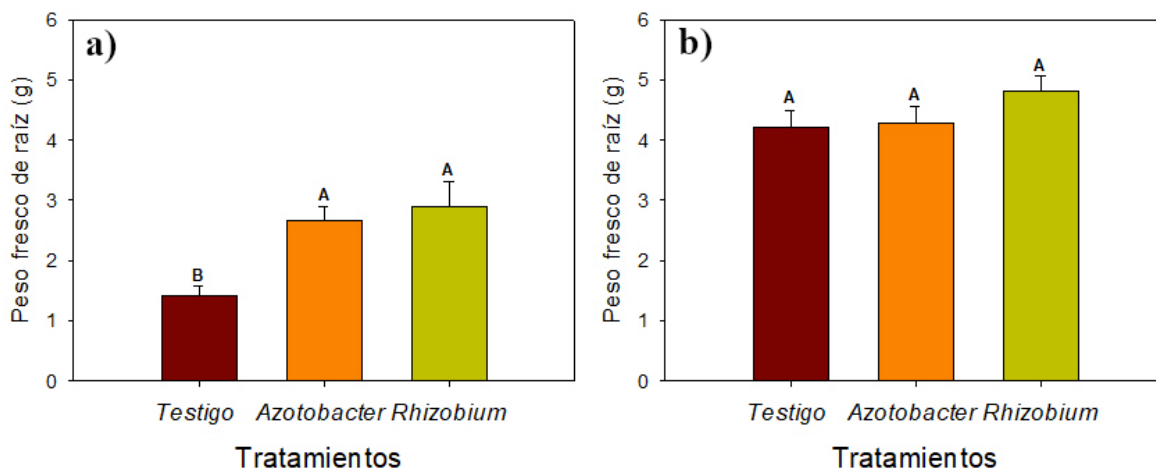


Figura 1. Efecto de los biofertilizantes comerciales *Azotobacter* y *Rhizobium* en el peso fresco de raíz en *P. vulgaris* (a) y *M. pruriens* (b). Valores promedio +SD, n = 12. Letras diferentes, en cada subfigura, indican diferencias significativas con base en la prueba LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). **Fuente:** propia

A diferencia de lo encontrado en el peso fresco de la raíz, en el número de hojas por planta no se encontraron diferencias entre los tratamientos en las plantas de *P. vulgaris* (Figura 2a). Sin embargo, la aplicación de los biofertilizantes comerciales incrementó el número de hojas en las plantas de *M. pruriens* (Figura 2b).

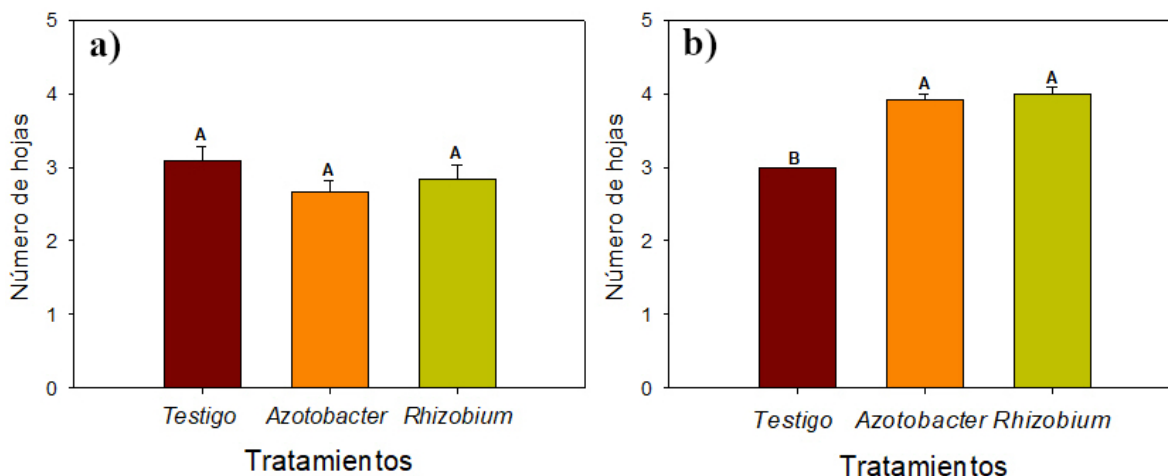


Figura 2. Efecto de biofertilizantes comerciales *Azotobacter* y *Rhizobium* en el número de hojas de plantas de *P. vulgaris* (a) y *M. pruriens* (b). Valores promedio +SD, n = 12. Letras diferentes, en cada subfigura, indican diferencias significativas con base en la prueba LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). **Fuente:** propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, la aplicación de los biofertilizantes *Azotobacter* y *Rhizobium* favoreció el crecimiento de la parte radicular en *P. vulgaris*; mientras que, en *M. pruriens* se estimuló el crecimiento foliar (Figura 3).

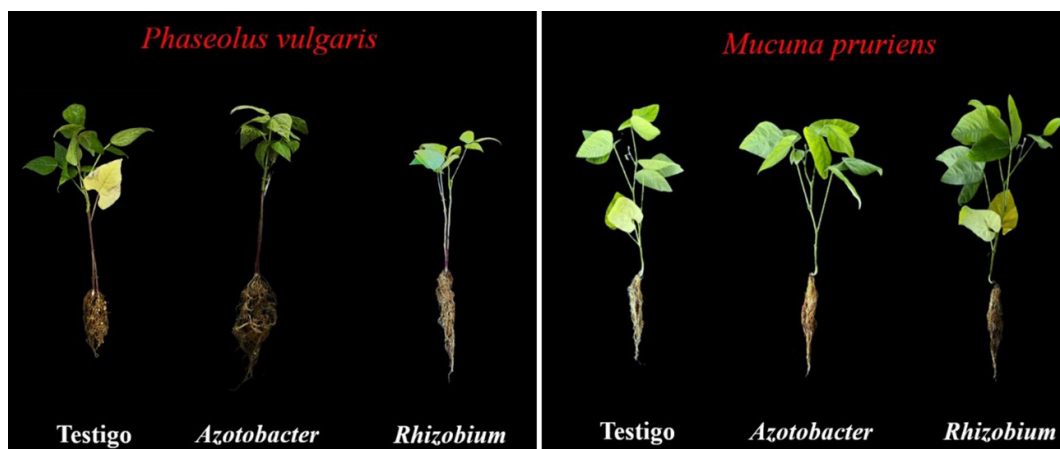


Figura 3. Plantas de frijol de la especie *M. pruriens* y *P. vulgaris* después de ocho semanas de la aplicación de los inoculantes comerciales con *Azotobacter* o *Rhizobium*

En las plantas de *M. pruriens* no hubo formación de nódulos. Sorpresivamente, en las plantas de *P. vulgaris* se presentó la formación de nódulos en las plantas testigo, sin la aplicación de los productos comerciales, indicando la presencia de bacterias nativas formadoras de nódulos en las semillas de frijol utilizado. La aplicación de los biofertilizantes comerciales *Azotobacter* o *Rhizobium* tuvieron un efecto antagónico con el número de nódulos, principalmente con *Rhizobium*, ya que se obtuvo una reducción significativa en la formación de nódulos (Figura 4). Lo anterior podría indicar una competencia entre las bacterias fijadoras de N por su establecimiento en la raíz.

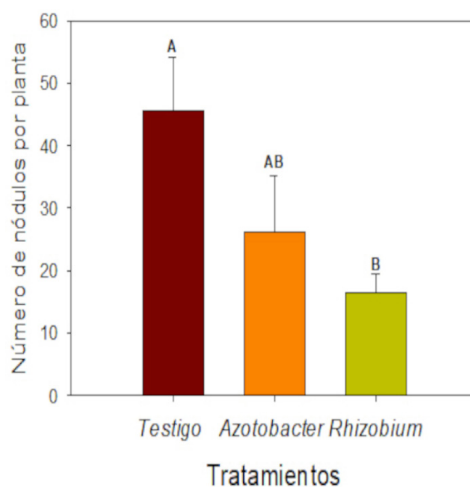


Figura 4. Número de nódulos de *P. vulgaris* después de la aplicación de los biofertilizantes comerciales *Azotobacter* y *Rhizobium*. Valores promedio \pm SD. Letras diferentes indican diferencias significativas con base en el método LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). **Fuente:** propia

El papel de *Trichoderma* en el crecimiento inicial de leguminosas

La inoculación con el hongo benéfico *T. asperellum* no tuvo efecto en la altura de las plantas de la leguminosa *P. vulgaris*; no obstante, se favoreció la altura del vástago de *M. pruriens* (Figura 5).

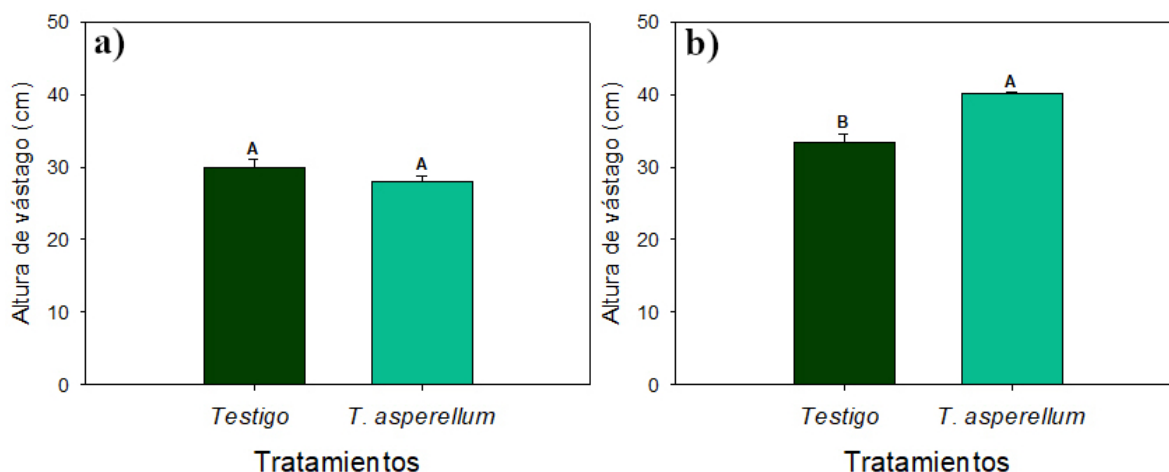


Figura 5. Efecto de *Trichoderma asperellum* en la altura de vástago de *P. vulgaris* (a) y *M. pruriens* (b). Valores promedio +SD, n = 12. Letras diferentes, en cada subfigura, indican diferencias significativas con base en el método LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). **Fuente:** propia.

La inoculación con *T. asperellum* no tuvo efecto en el peso fresco del vástago de las plantas de *P. vulgaris* (Figura 6a). Mientras que en las plantas de *M. pruriens* se tuvo mayor peso fresco de vástago (Figura 6b). Este impacto positivo se confirmó con un aumento en el peso seco del vástago de *M. pruriens* (Figura 6d); contrario a lo obtenido en el peso seco del vástago de *P. vulgaris*, donde se registró un valor significativamente menor al testigo (Figura 6c) con la aplicación de la suspensión de conidios de *T. asperellum*.

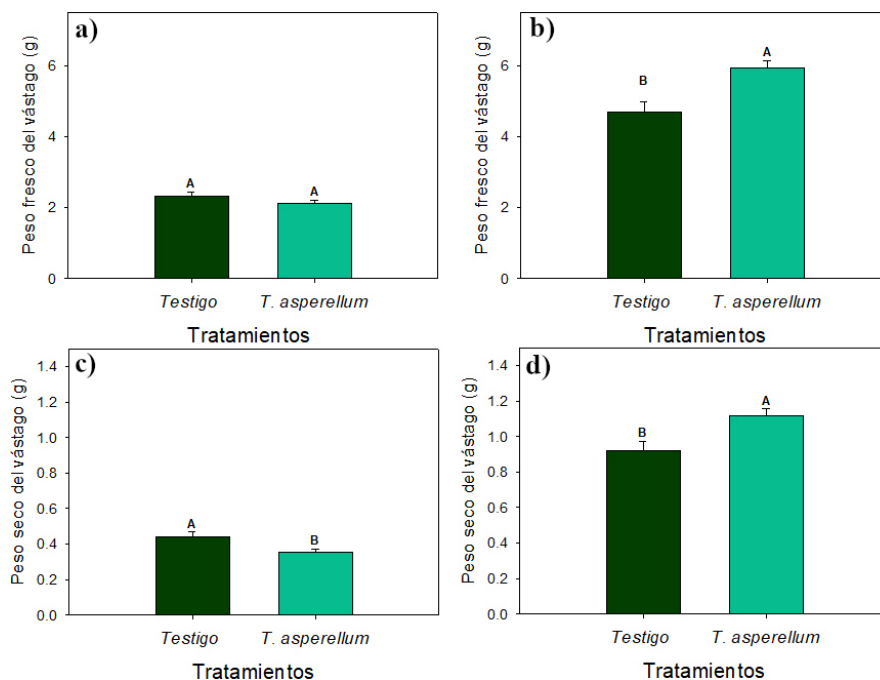


Figura 6. Efecto de la inoculación de *Trichoderma asperellum* en el peso de vástago. Peso fresco (a) y seco (c) de *P. vulgaris* y peso fresco (b) y seco (d) de *M. pruriens*. Valores promedio +SD, n = 12. Letras diferentes, en cada subfigura, indican diferencias significativas basadas en el método LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). **Fuente:** propia



Las plantas de *P. vulgaris* no respondieron a la inoculación *T. asperellum*, ya que no se encontraron diferencias significativas en la longitud de la raíz, el peso de la raíz, el número de hojas, el índice de clorofila o en el número de nódulos (Tabla 2). En el crecimiento de la raíz de *M. pruriens* tampoco hubo efectos positivos del hongo *T. asperellum*, incluyendo la longitud y el peso de la raíz o en la formación de nódulos. Por otro lado, el índice de clorofila fue superior en las hojas de *M. pruriens* tratadas con el hongo benéfico, aunque el número de hojas fue similar en el testigo y con la inoculación de *T. asperellum* (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de *T. asperellum* en el crecimiento vegetativo de plantas de leguminosas

Especie	Tratamiento	Longitud de raíz (cm)	Peso fresco de raíz (g)	Peso seco de raíz (g)	Número de hojas	Índice de clorofila	Número de nódulos
<i>P. vulgaris</i>	Testigo	13.95 ± 1.56 A	1.82 ± 0.53 A	0.18 ± 0.03 A	2.16 ± 0.38 A	22.47 ± 6.73 A	57.6 ± 13.1 A
	<i>Trichoderma</i>	13.63 ± 1.64 A	1.86 ± 0.51 A	0.19 ± 0.04 A	2.00 ± 0 A	24.14 ± 4.04 A	51.3 ± 17.8 A
<i>M. pruriens</i>	Testigo	15.80 ± 1.24 A	3.32 ± 1.10 A	0.24 ± 0.06 A	3.00 ± 0 A	32.1 ± 5.25 A	0.0
	<i>Trichoderma</i>	17.47 ± 2.82 A	3.43 ± 1.08 A	0.27 ± 0.08 A	3.08 ± 0.28 A	39.2 ± 2.74 B	0.0

Valores promedio ± SD, n = 12. Letras diferentes en cada columna representan diferencias significativas con base en el método LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). Fuente: propia

La inoculación con *T. asperellum* no tuvo efectos en el crecimiento de las plantas de *P. vulgaris*; mientras que en *M. pruriens* favoreció el desarrollo de la parte aérea de la planta (Figura 7), principalmente en el tamaño de las hojas, lo que se vio reflejado en el peso fresco y seco del vástago.

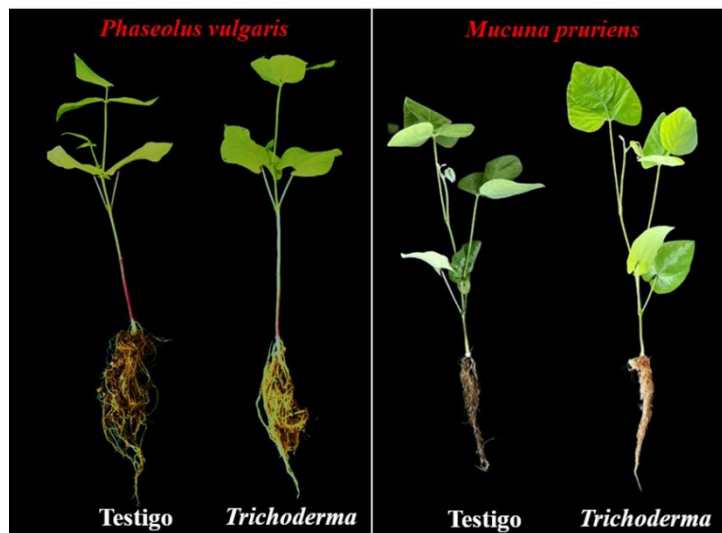


Figura 7. Plantas de *P. vulgaris* y *M. pruriens* cinco semanas después del inicio de la aplicación del inoculante de *T. asperellum*

Análisis de coordenadas principales

El análisis de agrupamiento demostró una clara separación por especie vegetal, un grupo correspondiente a *M. pruriens* y en otro a *P. vulgaris*. En esta última especie se formaron dos subgrupos, el primero se conformó en respuesta a la inoculación con

el biofertilizante *Azotobacter* y el hongo *Trichoderma* (I). El otro subgrupo se constituyó por el testigo y el biofertilizante comercial *Rhizobium* (II). Para el caso de *M. pruriens*, se formó un sólo grupo que incluyó todos los tratamientos evaluados (Figura 8).

No hubo variación atribuida a los tratamientos aplicados (testigo, *Azotobacter*, *Rhizobium* o *Trichoderma*), lo cual se corroboró con el análisis PERMANOVA ($p = 0.0586$); sin embargo, las diferencias entre especies vegetales fueron significativas ($p = 0.001$), así como el efecto entre los insumos dentro de la misma especie también resultaron significativas ($p = 0.001$).

Otro dato interesante es el comportamiento de las plantas testigo, principalmente de *M. pruriens*, que mostraron mayor dispersión y con la aplicación de los microorganismos benéficos se agruparon de forma más cercana, teniendo una respuesta más homogénea en el crecimiento cuando se aplican los biofertilizantes.

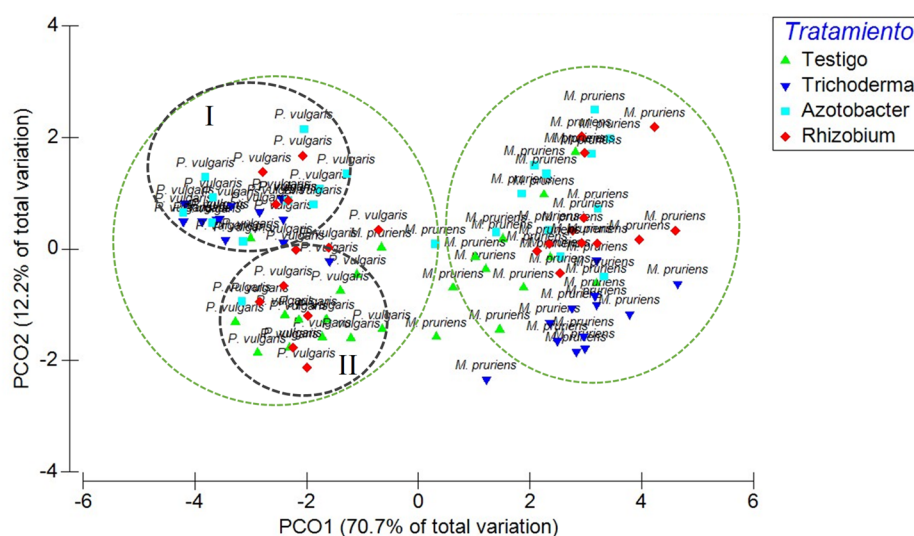


Figura 8. Análisis de coordenadas principales (PCO) de las especies de leguminosas *P. vulgaris* y *M. pruriens* con la aplicación de los biofertilizantes comerciales *Azotobacter* o *Rhizobium* y el hongo *T. asperellum*. **Fuente:** propia

Discusión

Las bacterias fijadoras de N de los géneros *Rhizobium* y *Azotobacter* se han empleado como biofertilizantes por su efecto positivo sobre el crecimiento vegetal, para aumentar la disponibilidad de nutrientes como el N y sintetizar hormonas vegetales (Aasfar *et al.*, 2021). En primer ensayo experimental, con la aplicación de dos biofertilizantes comerciales a base de *Rhizobium etli* o *Azotobacter* sp. se obtuvieron diferencias significativas en el número de hojas de plantas de la especie *M. pruriens*. Un efecto similar fue reportado por González *et al.* (2012) en *P. vulgaris*, donde hubo un aumento en el número de hojas trifoliadas en relación con el testigo sin inoculación. A diferencia de lo encontrado en este estudio con la aplicación de los inoculantes comerciales, ya que no se encontraron cambios significativos en el número de hojas, pero incrementó el peso fresco y la longitud de raíz de *P. vulgaris*,



lo que coincide con lo reportado por Dardanelli *et al.* (2008) quienes reportaron un aumento en el peso fresco y la longitud raíz.

En el caso de la presencia de nódulos en las raíces de las leguminosas, es un proceso de importancia fundamental en la fijación biológica de N, debido a la relación simbiótica entre la planta y la bacteria. Con la aplicación de los biofertilizantes comerciales *Rhizobium* o *Azotobacter* sólo se observaron nódulos en la especie *P. vulgaris*. Sin embargo, hubo una menor cantidad de nódulos por planta con respecto al testigo. Específicamente en este trabajo se obtuvieron 21 nódulos en promedio con el tratamiento de *Azotobacter* y 11 con el tratamiento de *Rhizobium*, a diferencia de un estudio realizado por Kumar *et al.* (2016), quienes reportaron 23.4 nódulos por planta; aunque en otra investigación se cuantificaron 10 nódulos por planta en la misma especie (Dardanelli *et al.*, 2008).

Se ha sugerido que la eficiencia de la nodulación podría estar asociada a la diversidad genética de las variedades de frijol, debido a que se ha encontrado que algunos genotipos de frijol pueden tener una afinidad diferente con distintos simbiontes de rizobios. A su vez, ciertas cepas de rizobios pueden tener una menor eficiencia de nodulación en diferentes variedades o especies de leguminosas, por lo que es probable que existan bacterias que sean específicas de cada variedad o especie de frijol (Menge *et al.*, 2018). Lo cual se comprueba con lo reportado por Triplett & Sadowsky (1992) y Mhamdi *et al.* (2002), quienes demostraron que los diferentes genotipos de frijol presentaron variabilidad en la nodulación. Un incremento en la nodulación, en plantas de frijol con rizobios nativos, se asoció con el hecho de que estos microorganismos nativos están adaptados a los genotipos del frijol específicos y pueden competir eficazmente en la colonización de las raíces (Ben Romdhane *et al.*, 2007). Por esta razón, la selección de cepas es importante para generar un bioinsumo debido a que cada cepa tiene diferentes mecanismos que pueden tener un efecto importante en la nodulación, así como en su capacidad para sobrevivir en climas extremos, tolerar los pesticidas y sobrevivir en el inoculante (Menge *et al.*, 2018; Poveda & Eugui, 2022) o competir con otras bacterias noduladoras, como el caso de *Rhizobium etli*, que fue el tratamiento donde se encontró el menor número de nódulos en *P. vulgaris*.

Respecto a los valores de SPAD que representan el índice de clorofila en las hojas y sirven como indicador clave de la biosíntesis de los pigmentos fotosintéticos en los cultivos, con la aplicación de *Rhizobium* no se obtuvieron cambios significativos en el índice de clorofila en *M. pruriens* o en *P. vulgaris*. Lo que difiere de lo reportado en otro estudio con plantas *P. vulgaris*, donde sí hubo un aumento en el contenido de clorofila asociado a un mayor número de nódulos (Nápoles-García *et al.*, 2016). Aunque los valores SPAD son similares a los obtenidos con el biofertilizante *Rhizobium*, no fue significativo y tampoco se generó un aumento en el número de nódulos.

Con el biofertilizante comercial *Azotobacter* no aumentó el índice de clorofila en las hojas en ambas especies, al contrario, en *P. vulgaris* se encontró un menor índice con respecto al testigo. Por su parte, Nava López *et al.* (2017) reportaron que en plantas de caña no encontraron cambios en los valores SPAD, utilizando *Azotobacter* como biofertilizante. En ese estudio destacan que los niveles de clorofila están asociados a la disponibilidad del N; sin embargo, esto puede cambiar cuando se alcanza un punto de saturación de N en donde se pueden afectar los niveles de clorofila a pesar de que las cantidades de N sean mayores en la fijación bacteriana.

Por otro lado, diferentes especies del género *Trichoderma* son conocidas como hongos promotores del crecimiento vegetal debido a su producción de enzimas solubilizadoras de fosfato y fitohormonas como el ácido indol acético y citoquininas (Poveda & Eugui, 2022). En el segundo ensayo experimental la aplicación de *T. asperellum* tuvo un efecto bioestimulante en el crecimiento de las plantas, reflejándose en mayor altura, peso fresco y seco del vástago en la especie *M. pruriens*. Contrario a lo obtenido en *P. vulgaris*, donde no se obtuvieron cambios significativos en ninguna de las variables evaluadas. A diferencia de lo reportado en otro estudio, donde incrementó la altura de la planta de *P. vulgaris* con la inoculación de *T. asperellum* (González-Marquetti *et al.*, 2021). Esta diferencia pudiera atribuirse al tiempo de inoculación con el hongo, que fue de siete días antes de la siembra de las semillas, lo que permitió un mayor desarrollo de la raíz y como consecuencia mejor absorción de nutrientes en etapas tempranas de crecimiento (González-Marquetti *et al.*, 2021). En otros estudios se reportó un mejor desarrollo y crecimiento en plantas de maracuyá con la aplicación de *T. harzianum*, ejerciendo un efecto positivo en el número de hojas, altura de planta, longitud de raíz, peso seco de la parte aérea y de la raíz con respecto al testigo (Padilla *et al.*, 2020).

En el presente estudio la inoculación de las semillas durante 3 h en una suspensión de conidios a una concentración de 1×10^8 conidios/mL no se encontraron diferencias significativas el crecimiento de las plantas de *P. vulgaris*. Mientras que en otra investigación con *P. vulgaris* hubo resultados significativos en el crecimiento de las plantas con 24 h de remojo de las semillas (González-Marquetti *et al.*, 2021). También es probable que el tamaño y la morfología de las semillas influya en el efecto del hongo, aunque el tiempo de contacto con la suspensión fue similar en ambas especies.

Se obtuvo un mayor índice de clorofila en *M. pruriens* con la inoculación de *T. asperellum*, con un valor de 39.2 equivalente a un aumento del 20% con relación al testigo. En el caso *P. vulgaris* no hubo cambios significativos. Se ha reportado que *Trichoderma* aumenta la capacidad fotosintética de las plantas. En un estudio realizado por Colla *et al.* (2015) se encontraron diferencias significativas en el valor SPAD de plantas de lechuga, pepino, chile y melón, aplicando *T. atroviride*, concluyendo que



ese aumento fue resultado de una mayor eficiencia en la biosíntesis de la clorofila debido a la aplicación del bioestimulante.

Zang *et al.* (2014) investigaron la eficiencia de la aplicación de *T. longibrachitum* y observaron un incremento en la cantidad de clorofila, así como en los niveles de enzimas relacionadas con el mecanismo de defensa de la planta (peroxidasa, polifenol oxidasa y la fenilalanina amonio-liasa). En su caso asociaron el crecimiento de la planta con parámetros relacionados con la altura, peso fresco y seco de la planta, así como un aumento en la defensa de la planta con la aplicación del hongo, mejorando su competitividad debido a su efecto en la solubilización de macronutrientes esenciales para el metabolismo de las plantas (Zang *et al.*, 2014).

El desarrollo de bioinoculantes está surgiendo como una estrategia clave para una agricultura sustentable. Este trabajo junto con otros estudios ha demostrado que, de manera individual, tanto las bacterias *Rhizobium* y *Azotobacter* como el hongo *Trichoderma* tienen un efecto positivo como promotores del crecimiento de las plantas cultivadas. Esto está dando pauta a que su combinación puede ofrecer una sinergia entre *Trichoderma* y las bacterias fijadoras de nitrógeno, lo que resultaría en más beneficios para los cultivos y lo convierte en una alternativa prometedora para el crecimiento y para el control de enfermedades de las plantas, incluyendo las provocadas por virus y la tolerancia al estrés abiótico (Poveda & Eugui, 2022). Sin embargo, se requiere de más estudios para comprender los mecanismos que se desencadenarían por el efecto sinérgico de estos microorganismos, lo que sería crucial para el desarrollo de formulaciones de bioinsumos eficaces.

Conclusiones

Los biofertilizantes comerciales que contienen *Azotobacter* o *Rhizobium* favorecieron de manera diferencial el crecimiento de las plantas, en *P. vulgaris* hubo mayor peso fresco de la raíz y en *M. pruriens* estimularon la formación de hojas. El mayor potencial en el crecimiento vegetativo se encontró con la inoculación de *T. asperellum* al mejorar los parámetros de crecimiento de la parte aérea de las plantas de *M. pruriens* (mayor altura de planta, peso fresco y seco del vástago e índice de clorofila).

Las bacterias *Azotobacter* y *Rhizobium*, así como el hongo *T. asperellum*, mostraron efectos positivos en algunas variables del crecimiento de las leguminosas *P. vulgaris* y *M. pruriens* durante la etapa vegetativa. Debido a estos resultados, los próximos estudios tendrían que estar enfocados en identificar el efecto de estos microorganismos en el rendimiento de los cultivos y en la calidad de las semillas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.



Financiamiento

Se agradece a CIATEJ por el financiamiento del proyecto “Maximizando el potencial del frijol *Mucuna*: estudio de su potencial nutracéutico y agronómico para su uso integral” (*Mucuna*), en el marco de la convocatoria PIICs 2023.

Agradecimientos

Se agradece a la M.C. Edna Esquivel Miguel por la cepa de *T. asperellum* y su identificación molecular.

Referencias

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Frontiers in microbiology*, *12*, 628379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Alcázar-Valle, M., García-Morales, S., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Sánchez-Osorio, E., Flores-López, L., Enríquez-Vara, J. & Lugo-Cervantes, E. (2021). Nutritional, antinutritional compounds and nutraceutical significance of native bean species (*Phaseolus* spp.) of mexican cultivars. *Agriculture*, *11*(11), 1031. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111031>
- Botello-Villagrana, F., & Martínez-Ramírez, D. (2021). *Mucuna pruriens* as adjunct therapy to levodopa in advanced Parkinson's disease. *Revista mexicana de neurociencia*, *22*(5), 180-183. <https://doi.org/10.24875/rmn.21000010>
- Ben Romdhane, S., Tajini, F., Trabelsi, M., Aouani, M. E., & Mhamdi, R. (2007). Competition for nodule formation between introduced strains of *Mesorhizobium ciceri* and the native populations of rhizobia nodulating chickpea (*Cicer arietinum*) in Tunisia. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *23*, 1195-1201. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9325-z>
- Colla, G., Roupael, Y., Di Mattia, E., El-Nakhel, C., & Cardarelli, M. (2015). Co-inoculation of *Glomus intraradices* and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *95*(8), 1706-1715. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6875>
- Dardanelli, M. S., de Cordoba, F. J. F., Espuny, M. R., Carvajal, M. A. R., Díaz, M. E. S., Serrano, A. M. G., Ocon, Y. & Megías, M. (2008). Effect of *Azospirillum brasilense* coinoculated with *Rhizobium* on *Phaseolus vulgaris* flavonoids and Nod factor production under salt stress. *Soil Biology and Biochemistry*, *40*(11), 2713-2721. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.06.016>
- González, R. L., Sosa, B. N., & Díaz, R. B. (2012). Efecto de la aplicación de *Rhizobium* y *Mycorriza* en el crecimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad CC-25-9



- negro. *Centro Agrícola*, 39(4), 17-20. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/centro-agricola/articulo/efecto-de-la-aplicacion-de-rhizobium-y-mycorrriza-en-el-crecimiento-del-frijol-phaseolus-vulgaris-l-variedad-cc-25-9-negro>
- González-Marquetti, I., Ynfante-Martínez, D., Gorrita, S., Morales-Mena, B., Nápoles, M. C., Delgado-Oramas, B. P., & Martínez-Coca, B. (2021). Efectos de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckfeldt & Nirenberg y Azofert® sobre el crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* L. *Revista de Protección Vegetal*, 36(3), 1-9. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522019000200004&lng=es&tlng=es.
- Hernández Melchor, D. J., Carmona Jiménez, J., Hidalgo Lara, M. E., Dendooven, L., Marsch Moreno, R., & Canizares Villanueva, R. O. (2016). Phylogenetic and morphological identification of a photosynthetic microbial consortium of potential biotechnological interest. *Hidrobiológica*, 26(2), 311-321. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972016000200311
- Hernández-Melchor, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). *Trichoderma*: importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(1), 98-112. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000205>
- Isidra-Arellano, M. C., & Valdés-López, O. (2022). ¿Cómo controlan las leguminosas el número de nódulos para evitar comprometer su crecimiento y desarrollo?. *Revista de Educación Bioquímica*, 41(2), 51-65. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=106596>
- Kumar, P., Pandey, P., Dubey, R. C., & Maheshwari, D. K. (2016). Bacteria consortium optimization improves nutrient uptake, nodulation, disease suppression and growth of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) in both pot and field studies. *Rhizosphere*, 2, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.09.002>
- Lampariello, L. R., Cortelazzo, A., Guerranti, R., Sticozzi, C., & Valacchi, G. (2012). The Magic Velvet Bean of *Mucuna pruriens*. *Journal of traditional and complementary medicine*, 2(4), 331-339. [https://doi.org/10.1016/s2225-4110\(16\)30119-5](https://doi.org/10.1016/s2225-4110(16)30119-5)
- León-Rojas, G. I., Rodríguez-Soto, C., & Padilla-Loredo, S. (2020). La conservación *in situ* del frijol criollo: construyendo soberanía alimentaria en el sureste del Estado de México. *Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana*, 5(9), 125-141. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=6681709960112500-8870>
- Liu, L., Zhang, X., Xu, W., Liu, X., Li, Y., Wei, J., Gao, M., Bi, J., Lu, X., Wang, Z. & Wu, X. (2020). Challenges for global sustainable nitrogen management in agricultural systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(11), 3354-3361. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00273>

- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., & Zarazúa Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(spe13), 2465-2474. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.461>
- Menge, E. M., Njeru, E. M., Koskey, G., & Maingi, J. (2018). Rhizobial inoculation methods affect the nodulation and plant growth traits of host plant genotypes: a case study of common bean *Phaseolus vulgaris* L. germplasm cultivated by smallholder farmers in Eastern Kenya. *Advances in Agricultural Sciences*, 6, 77-94. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/328886447>
- Mhamdi, R., Laguerre, G., Aouani, M. E., Mars, M., & Amarger, N. (2002). Different species and symbiotic genotypes of field rhizobia can nodulate *Phaseolus vulgaris* in Tunisian soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 41(1), 77-84. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb00968.x>
- Miranda, M. D. S. (2022). Potencial de aislados de *Trichoderma* spp como promotor de crecimiento en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Nexo Revista Científica*, 35(04), 924-934. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i04.15529>
- Nápoles García, M. C., Cabrera Pino, J. C., Onderwater, R., Wattiez, R., Hernández Forte, I., Martínez González, L., & Núñez Vázquez, M. (2016). Señales producidas por *Rhizobium leguminosarum* en la interacción con frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Cultivos Tropicales*, 37(2), 37-44. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4466.8405>
- Nava-López, L. F., Camacho-Millán, R., Aguilar-Medina, E. M., Romero-Navarro, J. G., Sosa-Pérez, R., Ruiz-Abitia, A. I., Cárdenas-Cota, H. & Ramos-Payán, R. (2017). Formulación de biofertilizantes a partir de aislados regionales de *Azotobacter* y *Azospirillum* y su efecto en cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en casa sombra. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2(2), 183-195. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.183>
- Padilla, G. D., Yzquierdo, G. A. R., Montana, L., Salas, T. C. M., Basso, C., & Montesuma, M. A. A. (2020). Efecto de la aplicación de bioestimulantes y *Trichoderma* sobre el crecimiento en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims) en vivero. *Bioagro*, 32(3), 195-204. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7901981>
- Poveda, J., & Eugui, D. (2022). Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus* and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. *Biological Control*, 176, 105100. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>
- Quiñones-Reyes, G., Ayala-Luján, J. L., & Aguayo-Rojas, J. (2021). Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sem-



- bradas en el estado de Zacatecas. *Acta universitaria*, 31, e3059. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3059>
- Rodríguez-García, D., & Vargas-Rojas, J. (2022). Efecto de la inoculación con *Trichoderma* sobre el crecimiento vegetativo del tomate (*Solanum lycopersicum*). *Agronomía Costarricense*, 46(2), 47-60. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52045>
- Triplett, E. W., & Sadowsky, M. J. (1992). Genetics of competition for nodulation of legumes. *Annual review of microbiology*, 46(1), 399-422. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.46.100192.002151>
- Zhang, S., Gan, Y., & Xu, B. (2014). Efficacy of *Trichoderma longibrachiatum* in the control of *Heterodera avenae*. *BioControl*, 59, 319-331. <https://doi.org/10.1007/s10526-014-9566-y>

Consortios nativos de hongos micorrícicos arbusculares y biochar en la promoción del crecimiento de plantas de girasol

Luis López Pérez¹, Santiago Rubio Marcos² y Alfredo Reyes Tena^{1*}

¹Laboratorio de Ecofisiología Vegetal, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

²Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

*Autor de correspondencia: alfredo.reyes@umich.mx

Resumen

Palabras clave:

biocarbón, colonización micorrícica, *Helianthus annuus*, micorriza arbuscular

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos consorcios micorrícicos arbusculares nativos de la rizosfera de agave de suelos agrícolas de Michoacán y un biochar producido a partir de bagazo de agave mezcalero, en el crecimiento de plantas de girasol bajo condiciones de invernadero. Durante el desarrollo del experimento se registraron distintas variables de crecimiento y a los 60 días después del trasplante se determinó el crecimiento de las plantas y el número de esporas y colonización micorrícica. Los resultados mostraron un incremento en los valores de crecimiento en plantas micorrizadas. La inoculación de consorcios micorrícicos en combinación con el biochar registró mayor número de esporas con respecto a los tratamientos sin biochar. En contraste, los tratamientos sin la adición de biochar registraron un porcentaje superior de colonización micorrícica. Estos resultados sugieren un efecto de inhibición de la colonización micorrícica por parte del biochar y reducción de sus efectos sobre las plantas.

Introducción

La degradación del suelo superficial, que abarca desde el aumento de la erosión, la salinización, acidificación, compactación y la escasez de agua, compromete el papel esencial que el suelo desempeña en la agricultura y la seguridad alimentaria (Gomiero, 2016). La degradación del suelo reduce la capacidad de los suelos para sustentar la vida vegetal y animal, así como su capacidad para regular los servicios ecosistémicos esenciales como la regulación del agua y el ciclo de nutrientes (Pereira *et al.*, 2018). En los úl-

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
215-230. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12774150>

Recibido: 28 abril 2024
Revisado: 22 mayo 2024
Aceptado: 1 julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



timos años la investigación en agricultura ha puesto un énfasis particular en el uso de técnicas que promuevan la salud del suelo y mejoren la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Martínez-Camacho *et al.*, 2022). El objetivo principal de las prácticas agrícolas sostenibles reside en preservar la salud del suelo y garantizar la productividad de los cultivos (Wezel *et al.*, 2014). Dentro del empleo de prácticas agronómicas de bajo impacto ambiental se encuentra el uso de inoculantes microbianos que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la salud, estructura del suelo y su microbiota en general (Sammauria *et al.*, 2020). En este sentido, el empleo de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en la productividad agrícola ha sido extensamente estudiado (Manoharan *et al.*, 2017). Se ha demostrado que la micorrización estimula el crecimiento de varias especies vegetales de importancia agrícola bajo condiciones de invernadero y campo, incluyendo el chile (Alonso-Contreras *et al.*, 2013), la papaya (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2019), el café (Hernández-Acosta *et al.*, 2018), el maíz, frijol (Reyes-Tena *et al.*, 2015) y el guayabo (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2020). Por otro lado, producción de glomalina por los HMA mejora la estructura del suelo, favoreciendo la formación de agregados de suelo, mejorando la retención de agua y la aireación en beneficio para las plantas (Rillig, 2014).

Por otra parte, también se ha explorado el uso de mejoradores del suelo que incrementan la capacidad de retención de agua y nutrientes, favoreciendo el crecimiento vegetal y el establecimiento de microorganismos benéficos. Uno de los mejoradores de suelo que recientemente ha sido estudiado es el biochar o biocarbón, el cual es un tipo de carbón obtenido mediante pirólisis, que implica la descomposición térmica de biomasa en ausencia de oxígeno (Elad *et al.*, 2011). Entre los beneficios directos asociados al uso del biochar se encuentran que sirve como un reservorio de carbono, favorece la porosidad y estructura del suelo, así como la infiltración del agua (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016). Sin embargo, el uso de biochar también se ha reportado que puede llegar a tener efectos negativos en el crecimiento vegetal, provocando fitotoxicidad (Manya *et al.*, 2012). Por este motivo, es necesario evaluar este mejorador de suelo en distintas especies vegetales y a distintas concentraciones (Khan *et al.*, 2018).

El empleo de HMA y biochar ha sido evaluado de forma individual; sin embargo, poco se ha explorado sobre su aplicación conjunta, compatibilidad y los potenciales efectos benéficos o tóxicos que podrían proporcionar a las plantas (Gujre *et al.*, 2021), principalmente bajo el contexto actual en el que hay escasez de agua y periodos prolongados de sequía en diversas zonas del planeta (Kamatchi *et al.*, 2024). Por tal motivo, es necesario realizar trabajos de investigación que permitan conocer estos beneficios, así como las limitantes del uso de los HMA y biochar en diferentes cultivos. En un estudio realizado por Sun *et al.* (2022), se investigaron los efectos del biochar y los HMA en el crecimiento del maíz. Los resultados revelaron



que la aplicación individual de HMA o biochar mejoró el crecimiento del maíz y aumentó los niveles de minerales en las raíces y los brotes, incluyendo nutrientes esenciales como fósforo, potasio, calcio y otros. Además, se observó un aumento en los pigmentos fotosintéticos en las hojas de plantas tratadas con HMA. Sin embargo, la combinación de HMA y biochar no mostró efectos sinérgicos en las variables evaluadas. También, la aplicación de biochar redujo la colonización de HMA en las raíces y disminuyó la dependencia del maíz a la micorrización. Por otro lado, existen reportes de que la inoculación de HMA y biochar fue positiva al incrementar el crecimiento de plantas de cebollín (*Allium fistulosum*), reflejado en una mayor altura de la planta, peso fresco y el diámetro de la raíz (Ji *et al.*, 2023). Con base en lo anterior, en este trabajo de investigación se evaluaron los efectos de consorcios de HMA nativos de suelos agrícolas de Michoacán en combinación con biochar en el crecimiento y desarrollo de plantas de girasol (*Helianthus annuus* L.), en condiciones de invernadero. El empleo de girasol en esta investigación, al ser una especie con cierta tolerancia a la sequía, representa una de las principales alternativas de cultivos en zonas con problemas de escasez de agua y degradación de suelos, por lo tanto, podría ser una especie modelo para la evaluación de la respuesta del uso de HMA y biochar como promotores del crecimiento vegetal y mejoradores del suelo. Debido a lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación de consorcios micorrícicos arbusculares y la adición de biochar en el crecimiento de plantas de girasol bajo condiciones de invernadero.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló en un invernadero tipo cenital de plástico, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ubicado en las coordenadas 19° 45' 95" N, 101° 09' 16" O, a 1900 msnm.

Material vegetal

Las plantas utilizadas se obtuvieron a partir de la germinación de semillas comerciales de *Helianthus annuus* var. Belleza de otoño. Las semillas se hidrataron en agua desionizada por 72 horas para favorecer la germinación. Posteriormente, las semillas se colocaron en charolas de germinación con vermiculita esterilizada. Se realizaron riegos por aspersión cada 24 horas durante dos semanas. Las plántulas se trasplantaron cuando tuvieron una altura promedio de 6 cm a macetas de plástico termoformadas de 1210 mL de volumen (Matec® de 6") con 500 g de suelo agrícola esterilizado en un esterilizador eléctrico (190 °C/96 h). El suelo fue un vertisol obtenido de una parcela agrícola localizada en Copándaro, Michoacán, con coordenadas 19°53'19.30"N y 101°12'21.90"O; este suelo presentó una conducti-



vidad eléctrica (C.E.) 1.68 Ds/m, pH de 7.53, densidad aparente (Dap) de 1.06 g/cm³, capacidad de campo (C.C.) de 37.40% y 116.57 ppm de P (muy alto). No se realizaron fertilizaciones durante el desarrollo del experimento. El riego se realizó cada 48 - 72 h a capacidad de campo, se colocó una charola debajo de cada maceta individual para capturar el agua de escurrimiento y conservar la humedad.

Material biológico

Se utilizaron los consorcios micorrícicos denominados “El Huizachal” (EH) y “El Limón” (EL), conformados por especies de HMA asociadas a la rizosfera de *Agave cupreata* de suelos agrícolas de Michoacán. Estos consorcios fueron proporcionados por el laboratorio de Ecofisiología vegetal y las especies que los conforman fueron previamente descritas por Trinidad-Cruz *et al.* (2017). EH contenía HMA pertenecientes a los géneros *Archaeospora*, *Acaulospora*, *Claroideoglossum*, *Diversispora*, *Entrophospora*, *Funneliformis*, *Septoglossum*, *Rhizophagus* y *Scutellospora*; mientras que el consorcio EL, esporas de los géneros *Archaeospora*, *Acaulospora*, *Claroideoglossum*, *Entrophospora*, *Funneliformis* y *Glomus*. Se inocularon 80 esporas de cada consorcio al momento del trasplante, cubriendo todo el sistema radical de la planta.

Biochar

El biochar se obtuvo a partir de la biomasa vegetal proveniente de los restos de agave mezcalero que se originan del proceso de producción de mezcal artesanal, de tal forma que se aprovecha como un subproducto mejorador del suelo. Este biochar registró las siguientes propiedades fisicoquímicas: pH de 8.5, 1.92 dSm⁻¹, de Conductividad eléctrica, 0.16, 0.64 y 16.7 meL⁻¹, de Nitrógeno total, fosfatos y potasio respectivamente, 0.67 meL⁻¹, de micronutrientes y 75.8% de materia orgánica. Se utilizó un contenido de biochar del 5% con respecto al volumen de sustrato de las macetas, de tal forma que se colocaron 50 g por maceta/planta directamente en el orificio de trasplante.

VARIABLES DE RESPUESTA

Las siguientes variables de respuesta se registraron desde el inicio del experimento, con mediciones cada siete días. Al final del experimento, (60 días después del trasplante), momento en el cual las plantas manifestaron estrés debido a la falta de nutrientes, por lo que no completaron su ciclo completo (120 – 140 días), se determinaron las variables de peso seco total, volumen de la raíz, y las variables microbiológicas de número de esporas de HMA y el porcentaje de colonización micorrícica en la raíz.

Altura de planta: para obtener la dimensión vertical del desarrollo de las plantas se llevó a cabo la medición de su altura en centímetros. Este procedimiento se realizó con un flexómetro, que se posicionó desde la base del tallo hasta el ápice de la última hoja totalmente formada.



Diámetro del tallo: la determinación del diámetro del tallo se realizó empleando un vernier digital, el cual se colocó a la altura de la base del tallo, el valor obtenido se registró en milímetros.

Número de hojas: se registró el número de hojas formadas de cada planta durante la fase de crecimiento y hasta el final del experimento.

Peso seco: al final del experimento se realizó un muestreo destructivo de todas las plantas, las cuales se sometieron a un proceso de secado en un horno a una temperatura constante de 60 °C durante cuatro días. Posteriormente se registró del peso seco de la parte aérea y radical de cada planta en una balanza analítica.

Volumen de raíz: Para calcular el volumen de las raíces de las plantas se empleó la técnica de volumen desplazado de agua en una probeta graduada de 100 mL, partiendo como base 50 mL y posterior registro del volumen desplazado después de sumergir por completo la raíz.

Conteo de esporas de HMA: se empleó la técnica de tamizado húmedo y decantación de Gerdemann y Nicolson (1963) con ligeras modificaciones. Se cuantificó el número de esporas en 50 gramos de suelo seco, que fueron colocados en un vaso de precipitados de 1 litro de capacidad. Luego se incorporó agua desionizada y se sometió a una agitación mecánica durante tres minutos. Posteriormente, se permitió un período de reposo de tres minutos y se procedió a separar el sobrenadante mediante una serie de tamices de graduaciones decrecientes: 600 μm , 150 μm , 75 μm y 45 μm . El contenido retenido en el tamiz de 45 μm fue recogido utilizando una piseta con agua desionizada. El material recuperado se depositó sobre papel filtro, que a su vez se dispuso en una caja de Petri. Para proceder al análisis se utilizó un microscopio estereoscópico, mediante el cual se efectuó el conteo minucioso de las esporas presentes.

Porcentaje de colonización micorrízica: Se empleó la técnica de clareo y tinción de raíces de Phillips y Hayman (1970), con modificaciones y el método de estimación de colonización micorrízica bajo microscopio óptico descrito por Hernández-Cuevas *et al.* (2012). Para el clareo de las raíces se tomaron muestras de raíz de cada planta (10 g aproximadamente) y se colocaron en cassettes de inclusión. Después, se colocaron en un vaso de precipitado de 1 L. Los cassettes se sumergieron en una solución de KOH al 10%, y luego se sometieron a calentamiento hasta alcanzar el punto de ebullición. Las raíces se mantuvieron en esta solución durante 2 min y 30 segundos, seguidos por un lavado con agua destilada para retirar los restos de la solución de KOH. Después, las raíces se sumergieron en una solución de HCl 1N durante 15 min, seguido de un proceso de lavado para eliminar cualquier residuo de la solución ácida. Finalmente, las raíces fueron transferidas y sumergidas en una solución de agua oxigenada al 30%, manteniendo esta inmersión durante un período de 5 min. La tinción se realizó utilizando azul de tripano al 0.05%, los



cassettes se sumergieron en la solución al punto de ebullición durante 35 segundos. Posteriormente, se lavaron con agua corriente y montaron 30 transectos de 1 cm en un portaobjetos para su observación. El porcentaje de colonización micorrícica se determinó mediante el registro de estructuras típicas de HMA, como micelio, vesículas, arbusculos y esporas. Se contabilizó el número de transectos colonizados, dividido entre el número total de transectos observados, el resultado se multiplicó por 100.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental bifactorial con las unidades experimentales distribuidas completamente al azar. El primer factor fueron los HMA con cuatro niveles: dos consorcios nativos de suelos agrícolas de Michoacán (“El Huizachal” (EH) y “El Limón” (EL)), un biofertilizante comercial Hiper-Glom (HG) a base del HMA *Rhizophagus intraradices* y un testigo sin inóculo micorrícico. El segundo factor fue el biochar con dos niveles correspondientes a dos proporciones de biochar adicionados al sustrato (0 y 5% P/P); generándose así ocho tratamientos con diez repeticiones para un total de 80 unidades experimentales. La unidad experimental fue una maceta con una planta de girasol. Los datos registrados se sometieron a análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95%.

Resultados y discusión

Las variables de crecimiento acumulativo (altura de planta, diámetro del tallo y número de hojas) mostraron variabilidad en los resultados (Figura 1). Por un lado, en la altura de planta se observó que los tratamientos inoculados con los consorcios micorrícicos sin biochar registraron un mayor tamaño al final del experimento, lo cual se reflejó en diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$). El control donde no se inoculó HMA ni biochar resultó ser el tratamiento que menor altura en promedio registró (Figura 1a). Vital-Vilchis *et al.* reportaron resultados similares en la misma variedad. (2020), donde la micorrización incrementó ligeramente la altura de las plantas; por otro lado, Langeroodia *et al.* (2022) reportó un incremento en la altura de plantas de girasol de un 5% al inocularlas con HMA y biochar e manera conjunta. Los resultados para el diámetro del tallo al momento de la cosecha de las plantas mostraron diferencias estadísticas significativas, donde el tratamiento de control con biochar (CONT-B) registró el mayor diámetro, y el consorcio EH sin biochar (EH-0) presentó el menor (Figura 1b). Para esta variable se observó que las plantas donde se aplicó biochar incrementaron su diámetro independientemente de la inoculación con HMA. Finalmente, la variable de número de hojas no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. En promedio, la pro-

ducción de hojas se mantuvo constante entre tratamientos durante el experimento y al final todas las plantas tuvieron 14 hojas de promedio (Figura 1c). Lo anterior puede ser por efecto de cierto nivel de estrés de las plantas al final del experimento al estar en un sustrato con poco volumen de suelo, o bien a que llegaron a floración. El número de hojas es un parámetro que está regulado a nivel genético en plantas de girasol pertenecientes a la misma variedad (Yeremenko *et al.*, 2017). En este sentido, el área foliar es un parámetro que permite una mayor resolución del crecimiento e incremento en biomasa de esta especie vegetal (Domaratskyi, 2021); sin embargo, la presencia de defoliación y el enrollamiento de las hojas dificultó su estimación.

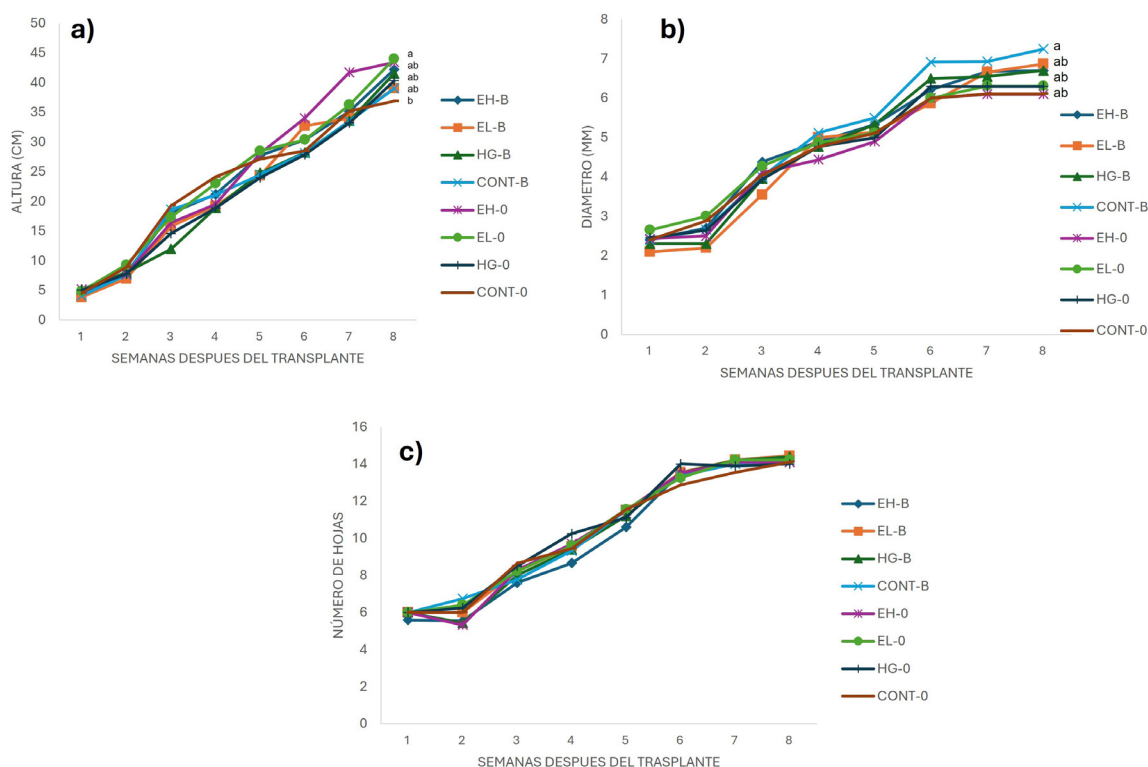


Figura 1. Variables de crecimiento registradas durante el desarrollo del experimento; : a) altura de planta; b) diámetro del tallo; c) número de hojas. Letras diferentes al final de las líneas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. EH: El Huizachal, EL: El Limón, HG: Hiperglomus, B: Biochar, CONT: control sin inóculo y sin biochar

Los resultados del análisis de la varianza del diseño factorial de las variables evaluadas en el muestreo destructivo al final del experimento (Tabla 1) indicaron que las variables microbiológicas (colonización y número de esporas) indicaron mejor los efectos de los factores estudiados (biochar e inóculo). En este caso, las variables agronómicas evaluadas relacionadas con el crecimiento vegetativo no reflejaron cambios significativos por efecto de los factores. Sin embargo, cuando ambos factores interactúan, las plantas de girasol mostraron cambios significativos en todas las variables evaluadas con excepción del peso seco de la parte aérea.

**Tabla 1.** Análisis de varianza de las variables de respuesta evaluadas al final del experimento

Factor	Variable Respuesta	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Valor de F	Significancia
Biochar (B)	VR	38.05	1	38.05	2.84	0.09
	PSR	1.09	1	1.09	6.66	0.01
	PSPA	0.32	1	0.32	0.47	0.49
	PSTOT	2.61	1	2.61	3.50	0.68
	Colonización	238.46	1	238.46	118.86	0.00
	No. Esporas	982.55	1	982.55	84.45	0.00
Inóculo micorrícico	VR	28.15	3	9.38	0.70	0.55
	PSR	0.29	3	0.09	0.59	0.62
	PSPA	4.00	3	1.33	1.92	0.14
	PSTOT	4.57	3	1.52	2.04	0.12
	Colonización	1169.97	3	389.99	194.39	0.00
	No. Esporas	35977.7	3	11992.5	1030.84	0.00
B X I	VR	457.51	3	152.50	11.38	0.00
	PSR	2.99	3	0.99	6.09	0.01
	PSPA	2.27	3	0.75	1.09	0.33
	PSTOT	4.94	3	1.64	2.20	0.01
	Colonización	300.69	3	100.23	49.96	0.00
	No. Esporas	1094.52	3	364.84	31.36	0.00

VR: volumen de raíz; PSR: peso seco de la raíz; PSPA: peso seco de la parte aérea; PSTOT: peso seco total.

En la Figura 2 se muestran los resultados de las variables microbiológicas de colonización micorrícica y número de esporas por efecto del factor biochar (a y b) y el factor HMA (c y d). Se observó que cuando se aplicó biochar disminuyó significativamente ($P < 0.05$) la colonización micorrícica hasta en 50%. Para la producción de esporas en el sustrato se encontró un resultado contrario al de la colonización: cuando el sustrato de crecimiento tuvo biochar la producción de esporas aumentó un 16%. Cuando se analizaron las variables microbiológicas por el factor inóculo micorrícico se encontró que para la variable de colonización micorrícica el consorcio EH alcanzó el mayor porcentaje (14%), siendo estadísticamente superior a los otros tratamientos. En la producción de esporas se registró más en los consorcios de HMA, obteniéndose en promedio 66 esporas en 50 g de sustrato, casi 17 veces más de lo inicialmente inoculado en el volumen total del sustrato. Los resultados anteriores reflejan que la adición de biochar al sustrato provocó un efecto de toxicidad en los HMA. Se ha reportado en diversos estudios que cuando los HMA están en situación de estrés disminuye la colonización micorrícica e incrementa la producción de esporas como un mecanismo de supervivencia (Verzeaux *et al.*, 2017; Peraza *et al.*, 2019). Por otro lado, la mayor colonización micorrícica y producción de esporas en los consorcios micorrícicos puede estar relacionada a que los consorcios al estar conformados por un mayor número de especies de HMA, es posible que

presenten distintas tasas de crecimiento y en sumatoria representen un incremento superior a la inoculación de una sola especie en el sustrato (Carballar-Hernández *et al.*, 2018; El Maaloum *et al.*, 2020). Sin embargo, estos resultados contrastan con lo reportado por Aggangan *et al.* (2019), quienes reportaron que la adición de biochar al sustrato de crecimiento incrementó la colonización micorrícica del 79 al 83% en plantas de cacao y de Figueiredo *et al.* (2019), quienes reportaron un incremento de la colonización micorrícica en plantas de maíz con la adición de enmiendas a base de biochar elaborado con diferentes temperaturas de pirólisis.

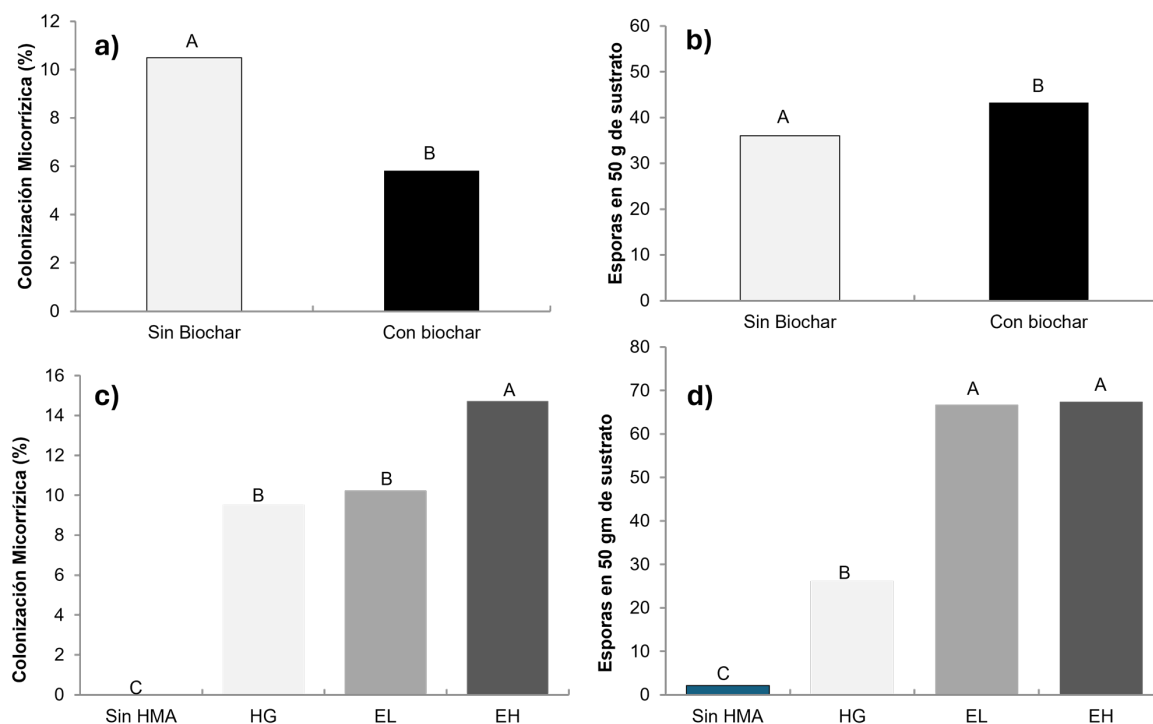


Figura 2. Variables microbiológicas registradas al final del experimento, Colonización micorrícica por efecto del factor biochar e inóculo micorrícico: a) y c); número de esporas en 50 gramos de suelo seco por efecto del factor biochar e inóculo micorrícico: b) y d)..); Letras diferentes arriba de las barras indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. EH: El Huizachal, EL: El Limón, HG: Hiperglomerus.

Los resultados de las variables de biomasa vegetal determinadas al final del experimento se muestran en la Tabla 2. De manera general se observó un incremento de las variables registradas en los tratamientos donde se inocularon HMA sin biochar y una reducción de estos valores al adicionar biochar al sustrato. Lo anterior podría reflejar un efecto negativo en el crecimiento vegetal al adicionar biochar, el cual se podría relacionar con el posible efecto tóxico del mismo sobre los HMA. El efecto negativo encontrado en este trabajo por la adición del biochar pudo deberse a varios factores: uno de estos pudo ser la dosis aplicada (5%), que para la especie utilizada en esta investigación resultara tóxica. Por otro lado, se tienen reportes de que las propiedades fisicoquímicas del biochar dependen de la biomasa donde se obtiene y las condiciones de pirólisis en su elaboración (Woolf *et al.*, 2010, Mukome *et al.*, 2013; de Figueiredo *et al.*, 2019; Tomczyk



et al., 2020). De acuerdo con la caracterización del biochar usado en este trabajo, su CE y pH pudieron haber afectado el desarrollo de la planta. Yuan y Xu (2010) mencionan que después de haber aplicado biochar al suelo el pH de este se incrementó de 0.5 a 1.05 unidades. Otra causa del efecto nocivo del biochar pudo deberse al método de aplicación, el cual fue localizado justo en la zona radicular. En varios trabajos del efecto benéfico del biochar en los cultivos la aplicación se realiza mezclando el biochar con el volumen total de suelo que se utiliza (Aggangan *et al.*, 2019; Li & Cai, 2021).

Tabla 2. Variables de biomasa vegetal registradas el final del experimento

Tratamiento	VR (ml)	PSR (g)	PSPA (g)	PSTOT (g)
EH-B	10.25 cd	1.2613 b	4.8975 a	6.1588 ab
EL-B	10.25 cd	1.2063 b	5.1775 a	5.3414 b
HG-B	12.25 bcd	1.5444 b	4.4333 a	6.316 ab
CONT-B	17 ab	1.4529 b	3.7783 a	6.13 ab
EH-0	18.6667 a	2.2422 a	4.563 a	6.7088 ab
EL-0	14.25 abcd	1.6413 ab	4.8475 a	7.4813 a
HG-0	16.4 abc	1.5444 b	4.1675 a	6.5525 ab
CONT-0	8.75 d	1.3167 b	4.3113 a	5.6863 b

VR: Volumen de la raíz, PSR: Peso seco de la raíz, PSPA: Peso seco de parte aérea, PSTOT: Peso seco total, PCM: Porcentaje de colonización micorrízica, ESP: Número de esporas.

En la Tabla 3 se muestra un análisis de correlación entre las variables de biomasa registradas al final del experimento, el biochar, la inoculación de HMA (micorrización) y el peso seco total. En todas las variables se encontró correlación significativa, con excepción del peso seco de la parte aérea con el factor biochar y del peso seco total con el factor micorrización. La correlación del biochar con las variables de respuesta resultó negativa para las variables VR, PSR, PSTOT y COL, lo cual indica que cuando se adicionó biochar al medio de crecimiento hubo una disminución en los valores de estas variables, es decir, hay una disminución en el crecimiento. Respecto a las variables microbiológicas, la correlación significativa negativa con la colonización micorrízica indica que el biochar afectó la simbiosis hongo-raíz. Las condiciones químicas del biochar probablemente afectaron el desarrollo de la micorrización. Esto puede indicar también que la producción de esporas tenga correlación positiva con el biochar indicando que cuando hay biochar la producción de esporas se incrementa, lo cual es una condición del hongo cuando se encuentra en situaciones de estrés. Para la inoculación de HMA en las plantas, con las variables evaluadas se encontró una correlación significativa con la mayoría de estas, excepto el peso seco total. Lo que indica que cuando no se inoculan las plantas el crecimiento se reduce, y se corrobora con la correlación positiva entre el peso seco total de las plantas y la colonización, indicando que cuando las plantas se inoculan aumenta su tamaño.

Los beneficios de la aplicación del biochar en el crecimiento y desarrollo vegetal están relacionados con la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo como un mayor almacenamiento de agua, mejora de la estructura del suelo, aportación de minerales, hábitat para el desarrollo de microorganismos, entre otros (Joseph *et al.*, 2021). De esta manera se esperaría que la aplicación conjunta de HMA y Biochar tuvieran un efecto sinérgico en el crecimiento y desarrollo vegetal. Lo anterior lo han mencionado Solaiman *et al.* (2020), quienes mencionan que la aplicación conjunta de biochar con gallinaza y fertilización química incrementó el contenido nutrimental de las plantas, el porcentaje de colonización micorrícica en raíces y en consecuencia el crecimiento de plantas de pepino. En el presente trabajo aquellas plantas que fueron inoculadas (independientemente si el medio donde crecieron tenía biochar) incrementaron su biomasa total un 10% más respecto a las no inoculadas. Aunque este incremento no resultó significativo, sí demuestra un efecto positivo en el crecimiento por la aplicación de los HMA. Esta falta de significancia probablemente se debió al efecto negativo que ocasionó el biochar cuando se aplicó al sustrato de crecimiento, lo cual indicó el análisis de correlación donde se encontró una correlación negativa significativa entre la aplicación de biochar al sustrato de crecimiento y las variables de crecimiento evaluadas en este trabajo. Una alternativa para contrarrestar el posible efecto tóxico del biochar es cambiar la materia prima de la cual se elaboró (Manrique & Sánchez, 2020). El biochar utilizado en esta investigación fue proveniente de restos de bagazo de agave mezcalero, quizás esto pudo afectar en alguna medida las propiedades del biochar, como el caso de la CE y el pH (Yuan & Xu, 2010). Algunas otras fuentes para la elaboración de biochar que son abundantes en Michoacán son: las ramas de aguacate que se desechan durante las podas de sanidad (Viteri *et al.*, 2021), el rastrojo y olotes de maíz, productos de desechos muy comunes en los centros de acopio de granos (Vallejos-Mihotek, 2018). Estas alternativas deben evaluarse previamente en experimentos como el presente, para que cuando se lleve este tipo de tecnología a campo pueda validarse para beneficio de los productores (Amaro-Rosales & Gortari-Rabiela, 2016).

Tabla 3. Matriz de correlaciones entre los factores estudiados y variables de biomasa vegetal y microbiológicas a los 60 días después del trasplante

Variable		VR	PSR	PSPA	PSTOT	COL	ESP
Biochar	r	-0.250	-0.307	0.70	-0.249	-0.366	0.128
	Significancia	0.04	0.01	0.58	0.04	0.001	0.05
Micorrización	r	-0.109	-0.236	-0.275	-0.151	-0.802	-0.926
	Significancia	0.03	0.05	0.02	0.23	0.000	0.00
PSTOT	r	.231	0.394	0.696	-	0.298	0.053
	Significancia	.084	0.00	0.00	-	0.019	0.681



Conclusiones

De acuerdo con los resultados y el análisis de la discusión de los mismos, se obtuvieron las siguientes conclusiones: 1) Los HMA promovieron el crecimiento vegetal en ausencia de biochar; 2) El biochar utilizado resultó ser negativo para los valores de crecimiento vegetal y de colonización micorrícica; 3) La aplicación de biochar se sugiere no se realice directamente en la zona de las raíces de las plantas, si no como mezcla en todo el volumen del sustrato de crecimiento; 4) Se deben explorar otras fuentes de biochar de tal forma que se refleje en beneficios para las plantas de girasol y el establecimiento de la simbiosis micorrícica; 5) Incluir consorcios de HMA nativos de cultivos agrícolas de girasol podría favorecer una mayor colonización micorrícica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

El presente trabajo fue financiado por los proyectos: “Uso de bioefectores en el crecimiento y desarrollo de especies vegetales de interés agrícola del estado de Michoacán” y “Evaluación de microorganismos rizosféricos en el desarrollo y sanidad de plantas de importancia comercial”. Del fondo de proyectos de investigación de la Coordinación de la Investigación Científica 2023 y 2024 de la UMSNH y los proyectos FCCHTI23_ME-4.1.-0011. Mantenimiento de equipo de laboratorio del Cuerpo Académico consolidado 069-Ecofisiología vegetal, para investigación y docencia y “Mantenimiento de sistemas de purificación de agua para experimentación en ecofisiología vegetal” del programa de Mantenimiento de equipo científico y/o tecnológico (2023), del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI), del estado de Michoacán.

Referencias

- Aggangan, N. S., Cortes, A. D., Opulencia, R. B., Jomao-as, J. G., & Yecyec, R. P. (2019). Effects of mycorrhizal fungi and bamboo biochar on the rhizosphere bacterial population and nutrient uptake of cacao (*Theobroma cacao* L.) Seedlings. *Philippine Journal of Crop Science (PJCS)*, 44(1), 1-9.
- Alonso-Contreras, R., Aguilera-Gómez, L. I., Rubí-Arriaga, M., González-Huerta, A., Olalde-Potugal, V., & Rivas-Manzano, I. V. (2013). Influencia de hongos micorrícicos arbusculares en el crecimiento y desarrollo de *Capsicum annuum* L. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(1), 77-88.

- Amaro-Rosales, M., & Gortari-Rabiela, R. D. (2016). Políticas de transferencia tecnológica e innovación en el sector agrícola mexicano. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 13(3), 449-471.
- Carballar-Hernández, S., Hernández-Cuevas, L. V., Montaña, N. M., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2018). Species composition of native arbuscular mycorrhizal fungal consortia influences growth and nutrition of poblano pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Applied Soil Ecology*, 130, 50-58.
- de Figueiredo, C. C., Farias, W. M., Coser, T. R., de Paula, A. M., Da Silva, M. R. S., & Paz-Ferreiro, J. (2019). Sewage sludge biochar alters root colonization of mycorrhizal fungi in a soil cultivated with corn. *European Journal of Soil Biology*, 93, 103092.
- Domaratskyi, Y. (2021). Leaf area formation and photosynthetic activity of sunflower plants depending on fertilizers and growth regulators. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6).
- El Maaloum, S., Elabed, A., Alaoui-Talibi, Z. E., Meddich, A., Filali-Maltouf, A., Douira, A., ... & El Modafar, C. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria consortia associated with phospho-compost on phosphorus solubilization and growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(5), 622-634.
- Elad, Y., Cytryn, E., Harel, Y. M., Lew, B., & Graber, E. R. (2011). The biochar effect: plant resistance to biotic stresses. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(3), 335-349.
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Bio-carbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological society*, 46(2), 235-244.
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, 8(3), 281.
- Gujre, N., Soni, A., Rangan, L., Tsang, D. C., & Mitra, S. (2021). Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Environmental Pollution*, 268, 115549.
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Fernández, A., & González-Chávez, M. C. Trejo-Aguilar, D. (2018). Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades garnica, catimor, caturra y catuaí. *Agro Productividad*, 11(4).
- Hernández-Cuevas, L. V., P. Guadarrama-Chavez, I. SánchezGallen y J. Ramos-Zapata. (2012). Micorriza arbuscular, colonización intrarradical y extracción



- de esporas de suelo. En F. J. Álvarez S. y A. Monroy A. (Comps.), *Técnicas de estudio de las asociaciones micorrízicas y sus implicaciones en la restauración* (pp. 1-6). UNAM Fac. de Ciencias. ISBN: 978-607-02-3493-4.
- Ji, C., Li, Y., Xiao, Q., Li, Z., Wang, B., Geng, X., Lin, K., Zhang, Q., Jin, Y., Zhai, Y., Li, X., & Chen, J. (2023). Combined application effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the rhizosphere fungal community of *Allium fistulosum* L. *Journal of microbiology and biotechnology*, 33(8), 1013–1022.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., ... & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *Gcb Bioenergy*, 13(11), 1731-1764.
- Kamatchi, K. M., Anitha, K., Kumar, K. A., Senthil, A., Kalarani, M. K., & Djanaguiraman, M. (2024). Impacts of combined drought and high-temperature stress on growth, physiology, and yield of crops. *Plant Physiology Reports*, 29(1), 28-36.
- Khan, T. F., Salma, M. U., & Hossain, S. A. (2018). Impacts of different sources of biochar on plant growth characteristics. *American Journal of Plant Sciences*, 9(9), 1922-1934.
- Langeroodia, A. S., Tedeschi, P., Allevato, E., Stazi, S. R., Aadil, R. M., Mancinelli, R., & Radicetti, E. (2022). Agronomic response of sunflower subjected to biochar and arbuscular mycorrhizal fungi application under drought conditions. *Italian Journal of Agronomy*, 17(3).
- Li, M., & Cai, L. (2021). Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi play different roles in enabling maize to uptake phosphorus. *Sustainability*, 13(6), 3244.
- Manoharan, L., Rosenstock, N. P., Williams, A., & Hedlund, K. (2017). Agricultural management practices influence AMF diversity and community composition with cascading effects on plant productivity. *Applied Soil Ecology*, 115, 53-59.
- Manrique H. J. A., & Sanchez G. J. C. (2020). *Revisión bibliográfica de los procesos y metodologías para elaborar biochar a partir de residuos agrícolas y lodos de depura* [Tesis de grado de bachiller, Universidad Católica San Pablo]. Repositorio institucional Universidad Católica San Pablo. <https://hdl.handle.net/20.500.12590/16356>
- Manyà, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*, 46(15), 7939-7954.
- Martínez-Camacho, Y. D., Negrete-Yankelevich, S., Maldonado-Mendoza, I. E., Núñez-de la Mora, A., & Amescua-Villela, G. (2022). Agroecological management with intra-and interspecific diversification as an alternative to conventional soil nutrient management in family maize farming. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 46(3), 364-391.
- Mukome, F. N., Zhang, X., Silva, L. C., Six, J., & Parikh, S. J. (2013). Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(9), 2196-2204.

- Peraza, R. A. H., Bever, J., Gómez, E. F. F., Sánchez, R. L. F., & Oliver, P. P. H. (2019). Estrategias funcionales de la diversidad HMA: importancia del análisis del número de esporas o de los biovolúmenes/Functional strategies of AMF diversity: significance of analyzing spores numbers or biovolumes. *Acta Botánica Cubana*, 218(2).
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13.
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society*, 55(1), 158-IN18.
- Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández Cuevas, L. V., López Pérez, L., & Rincón Enríquez, G. (2019). Efectividad de hongos micorrízicos arbusculares nativos de rizosfera de Agave como promotores de crecimiento de papaya. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 163-174.
- Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., & López-Pérez, L. (2020). Hongos micorrízicos nativos como promotores de crecimiento en plantas de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(3), 541-554.
- Reyes-Tena, A., López-Pérez, L., Quiñones-Aguilar, E. E., & Rincón-Enríquez, G. (2015). Evaluación de consorcios micorrízicos arbusculares en el crecimiento vegetal de plantas de maíz, chile y frijol. *Biológicas*, 17(2), 35-42.
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4), 355-363.
- Sammauria, R., Kumawat, S., Kumawat, P., Singh, J., & Jatwa, T. K. (2020). Microbial inoculants: potential tool for sustainability of agricultural production systems. *Archives of microbiology*, 202(4), 677-693.
- Solaiman, Z. M., Shafi, M. I., Beamont, E., & Anawar, H. M. (2020). Poultry litter biochar increases mycorrhizal colonisation, soil fertility and cucumber yield in a fertigation system on sandy soil. *Agriculture*, 10(10), 480.
- Sun, J., Jia, Q., Li, Y., Zhang, T., Chen, J., Ren, Y., Dong, K., Xu, S., Shi, N. N., & Fu, S. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on growth, nutrient absorption, and physiological properties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 8(12), 1275.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191-215.
- Trinidad-Cruz, J. R., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., López-Pérez, L., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares



- asociados a la rizosfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Revista mexicana de micología*, 45, 13-25.
- Vallejos Mihotek, C. A. (2018). *Selección de materias primas para la elaboración de un mejorador de suelos (biocarbón) en una localidad del centro de Veracruz* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio institucional COLPOS. <http://hdl.handle.net/10521/3029>
- Verzeaux, J., Nivelles, E., Roger, D., Hirel, B., Dubois, F., & Tetu, T. (2017). Spore density of arbuscular mycorrhizal fungi is fostered by six years of a no-till system and is correlated with environmental parameters in a silty loam soil. *Agronomy*, 7(2), 38.
- Vital-Vilchis, I., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Growth of ornamental sunflower in pot at field level by effect of arbuscular mycorrhizal fungi. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 679-692.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J. F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 34(1), 1-20.
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1, 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Yeremenko, O., Kalenska, S., Kiurchev, S., Rud, A., Chynchyk, O., & Semenov, O. (2017). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) productivity under the effect of plant growth regulator in the conditions of insufficient moisture. *Agricultural Sciences and Practice*, 2(1), 196-217. <https://doi.org/10.15407/agrisp4.01.011>
- Yuan, J.H., Xu, R.K., (2010). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use Manage*, 27(1), 110-115.

Evaluación de un bioproceso para la producción de ácido indol acético en *Bacillus subtilis*

Alejandro Quintana Menéndez¹, Diana De la cruz García², Hilda Vázquez López³, Juan Gabriel Viguera Ramírez⁴ y Roberto Olivares Hernández^{4*}

¹Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México 05370, México.

²Ingeniería Biológica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México 05370, México.

³Departamento de Medicina Molecular y Bioprocesos, Instituto de Biotecnología-Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 2001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, 62210, México.

⁴Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Cuajimalpa de Morelos, Ciudad de México, 05348, México.

*Autor de correspondencia: rolivares@cua.uam.mx

Resumen

Palabras clave:

bioinsumo, *Bacillus subtilis*, ácido indol-3 acético

El uso de bioinsumos agrícolas es una alternativa al empleo de fertilizantes químicos en la producción agrícola sustentable y la obtención de productos orgánicos y cuyo mercado de consumo ha venido creciendo en los últimos años. Algunas bacterias de la rizosfera, tales como *Bacillus subtilis*, tienen la potencialidad de producir compuestos que estimulan el crecimiento de las plantas, tal como son las auxinas, entre las cuales se encuentra el ácido indol 3 acético (AIA). Esta auxina tiene la característica de promover el crecimiento radicular, así como otros procesos fisiológicos relacionados al alargamiento y división celular, diferenciación de tejidos y fototropismo. Por lo tanto, el AIA como bioinsumo para la producción agrícola y su producción por medio de cultivo microbiano ha generado mayor interés en los últimos años. A partir de datos de cultivo reportados previamente y de la aplicación del sobrenadante en el crecimiento de plantas de lechuga y jitomate, se llevó a cabo el diseño de un bioproceso con el software SuperPro Designer® para evaluar técnica y económicamente la producción de AIA en *Bacillus subtilis*. Los resultados de la simulación indican que es factible la producción de AIA en *Bacillus subtilis* utilizando un medio definido, propionato y triptófano como fuentes de carbono.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
231-244. ISSN: 3061-709X.
[https://doi.org/10.5281/
zenodo.12774298](https://doi.org/10.5281/zenodo.12774298)

Recibido: 13 abril 2024
Revisado: 20 mayo 2024
Aceptado: 4 julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

El principal objetivo de la agricultura es la obtención de alimentos para el consumo humano, a la vez que se convierte en una actividad económica de relevancia que genera empleos y contribuye al desarrollo y sustentabilidad de las naciones (Pérez Cruz, 2020). El aumento de la demanda alimentaria ha propiciado prácticas ecológicamente agresivas que, para aumentar los rendimientos de producción, utilizan grandes cantidades de agroquímicos. La alternativa al uso de agroquímicos es el uso de bioinsumos agrícolas, basados en compuestos de microorganismos o plantas, capaces de mejorar las prácticas agrícolas, sin generar impactos negativos en el agroecosistema (Dayan & Duke, 2014; Duke, 2018; Gerwick & Sparks, 2014). En los últimos años se ha incrementado la demanda de productos ecológicamente amigables, o biorgánicos, que además de ofrecer beneficios económicos son una alternativa que impacta en la económica circular (Kaur, P. et al, 2019; Priya, A.K. et al. 2023). El empleo de biofertilizantes y estimulantes elaborados con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB por sus siglas en inglés) constituye una práctica que ha cobrado un singular interés en la agricultura moderna. La mayoría de las PGPB se encuentran en la rizosfera, un ambiente natural propicio para el desarrollo de estos microorganismos que establecen relaciones simbióticas con las plantas. En estos entornos se han encontrado cepas de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, y *Rhizobium* (Higuera et al., 2019).

En particular, la producción de hormonas que favorecen el crecimiento vegetal, como el ácido indol acético (AIA), ha adquirido mayor interés. El mercado global de AIA reporta un crecimiento económico debido a la demanda por productos alimenticios que sean sustentables y ecoamigables, lo que ha impulsado la necesidad de su producción y que se espera alcance un valor de miles de millones de dólares hasta el 2030 (“Global Indole-3- acetic Acid (IAA) Market Size”, Market Reports Word). Teniendo en cuenta los datos para México en 2022 el intercambio comercial total de AIA (incluyendo compras y ventas internacionales) fue de \$246M USD (<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/actic-acid>). De esta manera en años recientes se ha incrementado el esfuerzo de producirlo por medio de microorganismos.

Rutas de síntesis de AIA en *Bacillus subtilis*

Las vías de biosíntesis que se han identificado para producir AIA pueden ser clasificadas con base a su dependencia de la utilización de triptófano como precursor (Patten, 2022), se ha reportado que para el género *Bacillus* predominan tres vías 1) vía del indol-3-acetonitrilo (IAN), 2) vía del indol-3- piruvato (IPA) y la mejor caracterizada 3) vía del indol-3-acetamida (IAM). En el caso particular de *Bacillus subtilis*, esta es una rizobacteria promotora del crecimiento vegetal debido a la pro-



ducción de metabolitos como auxinas, sideróforos, ácidos orgánicos y antibióticos (Anguiano-Cabello *et al.*, 2019); la síntesis de AIA es parte del metabolismo secundario de esta bacteria lo que resulta en una gran ventaja para obtener esta auxina de manera natural. El AIA se sintetiza utilizando precursores obtenidos del medio en el que la plantas se desarrolla, y que son parte del metabolismo secundario de otros microorganismos de la rizosfera (Widawati, 2020).

La vía de la indol-3-acetamida fue identificada durante la evaluación de la producción utilizando el modelo metabólico a escala genómica de *Bacillus subtilis* (Castillo Alfonso *et al.*, 2021). Se lleva a cabo en una reacción de dos pasos; la molécula de triptófano se convierte en el intermediario de la vía por la enzima triptófano 2- monooxigenasa, para posterior hidrolizarse el indol-3-acetamida a ácido indol-3-acético por la enzima hidrolasa/amidasa (Pollmann *et al.*, 2002).

Producción de AIA por medio de cultivos de Bacillus

Las bacterias del género *Bacillus* son generalmente protótrofas es decir son capaces de crecer en medios sin requerimientos adicionales, además tiene un crecimiento rápido en condiciones de temperatura ambiente y con fuentes de carbono económicas (Su *et al.*, 2020).

Se ha reportado la producción de AIA con cepas como *Bacillus circulans* E9 en biorreactores a partir de fuentes industriales de carbono como soya, harina de guisante y extracto de levadura como fuentes de carbono alcanzando concentraciones de $7.81 \pm 0.16 \mu\text{g mL}^{-1}$ de la hormona (Sarmiento-López *et al.*, 2022). Otra cepa aislada, *B. subtilis* DR2 (KP455653) se ha cultivado para producir $137.81 \mu\text{g mL}^{-1}$, utilizando 1 g L^{-1} de triptófano como inductor en un medio denominado JNFb⁻, varias fuentes de carbono y concentraciones de sales se ocuparon para optimizar la producción (Kumari *et al.*, 2018). De igual manera se ha ocupado la cepa *Bacillus megaterium* BM5 con el cual reportan $320 \mu\text{g mL}^{-1}$ utilizando de igual manera triptófano como inductor (Lee, J. C., & Whang, K. S. 2016). Dado el interés por producir AIA, otras estrategias se han empleado como la modificación genética de otra especie microbiana *Escherichia coli* para la producción de la auxina alcanzando concentraciones de 7.10 g/L usando una concentración del inductor triptófano de 10 g/L (Wu *et al.*, 2019).

Para propósitos de producción óptima por medio de microorganismos es necesario el diseño de cultivos con medio mínimo y fuentes de carbono económicas, por lo que es necesario llevar a cabo la prueba de distintas fuentes de carbono. Previamente, se ha reportado la producción de AIA utilizando diversas fuentes de carbono, siendo el propionato de sodio la fuente óptima para obtener mejores rendimientos producto/ sustrato de esta auxina (Castillo Alfonso *et al.*, 2021; Quintana, 2022). Adicionalmente se considera que es una fuente de carbono relativamente económica, por tanto, resulta viable su empleo en procesos a escala industrial. El propionato de sodio es la sal



sódica del ácido propiónico y pertenece a los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) más abundantes y como un subproducto de la fermentación bacteriana (Dolan *et al.*, 2018). A partir de la secuencia del genoma de *Bacillus subtilis* y del modelo metabólico a escala genómica se comprobó que la vía que emplea este microorganismo es la de síntesis del indol acetamida (IAM) (Velasco-Jiménez *et al.*, 2020). La evaluación de las concentraciones de AIA demostraron que la producción de AIA ocurre casi de manera equimolar con base en el inductor triptófano. Teniendo en cuenta estos primeros resultados, se escaló el cultivo a un biorreactor de 2 L, los parámetros experimentales para el diseño fueron reportados previamente: concentración de 0.5 g/L de triptófano resultando en una concentración de 0.31 g/L de AIA (Castillo-Alfonso *et al.*, 2022). Con base en estos resultados, en este trabajo presentamos el diseño conceptual de un bioproceso utilizando el software *Super Pro Designer*, para la biosíntesis de ácido indol-3-acético a partir de *Bacillus subtilis*, con la intención de evaluar la factibilidad económica de utilizar propionato y triptófano como inductor.

Materiales y Métodos

Microorganismo y condiciones de cultivo

La metodología utilizada para la producción de AIA utilizando *Bacillus subtilis* W168 se reportó previamente (Castillo-Alfonso *et al.*, 2022) y a continuación se reportan los detalles. Para obtener los datos cinéticos de la fermentación se emplea la cepa *Bacillus subtilis* W168 perteneciente al banco celular del Laboratorio de Biotecnología de la UAM Cuajimalpa. Primeramente, se comprueba la viabilidad y pureza de la cepa. Para ello se realizó un cultivo en placas Petri estriado del microorganismo utilizando Agar Nutritivo (Merck) de manera que a las 24 horas de crecimiento se comprobó que las colonias tenían la apariencia típica de *Bacillus subtilis*. Además del análisis macroscópico se utilizó un microscopio óptico (Nikon) a 1000X previamente realizada la metodología de Tinción de Gram.

El medio de cultivo que fue utilizado para los experimentos consistió en un medio mínimo a base de sales (químicamente definido, cómo también se conoce) y que es una variante del medio M9, donde fueron ajustados algunos parámetros en base a la composición Carbono/ Nitrógeno, así como componentes necesarios para mantener el pH de este en un valor óptimo. Se utilizó como fuente de carbono Propionato (Merck).

Para cada experimento se preparó un inóculo partiendo de los crioviales conservados a -80 °C, fueron cultivados en medio sólido conteniendo Agar Nutriente mediante estriado para incubarse a 33 °C por un período de 24 horas.

Condiciones de cultivo en Biorreactor

Se equipó un biorreactor (*New Brunswick BioFlo III*) con una capacidad de 3 L (volumen total) para los experimentos y cinéticas de crecimiento, consumo de sustratos y



producción. El equipo permitió un monitoreo de varios parámetros que caracterizan el proceso de producción de AIA pues se contó con sensor de pH, sensor de oxígeno disuelto (DO), sensor de temperatura. De igual manera fueron acoplados sensores para el monitoreo de CO_2 y el O_2 (Blue Sense). Se acopló la consola del equipo a un software (Biorec 1.3.0.0/ Bioreactor Controller 2016) mediante el cual se controló el proceso. El registro de los sensores Blue Sense se obtiene en este caso mediante el software que recomienda el proveedor (Ferm Vis/ Versión 2.0.3.3_2010).

El equipo fue esterilizado antes de cada cultivo conteniendo el medio mínimo M9 modificado, suplementado con Trp a las 15h de cultivo. Antes de la inoculación se ajustan y calibran los sensores y se preparan las condiciones de trabajo que en estos experimentos se mantiene una temperatura constante de 30 °C mediante mantilla de calentamiento, se ajusta la agitación a 250 rpm (impelentes tipo Rushton), durante todo el proceso hay un suministro de aire pues es un cultivo aerobio (filtro de venteo de 50 mm y 0.2 μm antes de la entrada al biorreactor para garantizar un flujo estéril). El volumen de trabajo fue de 2 L.

Análisis de las muestras. Determinación de biomasa

El incremento de biomasa en los cultivos se determinó mediante peso seco. Los pellets se secaron en estufa (Fisher Scientific) a 80 °C durante 24h. Tras ese período de secado, se determinó el peso seco de la biomasa en una balanza analítica (Mettler Toledo). Se midió la absorbancia a 600 nm en el Espectrofotómetro (Thermo Scientific) de manera que con los valores de peso seco conocidos y su correspondiente en la lectura del espectrofotómetro se elaboró una curva patrón que relaciona ambos parámetros para este cultivo, de manera que se pueden interpolar y obtener los valores de peso seco a partir de la lectura de absorbancia correspondiente a cada muestra en la cinética.

Determinación del consumo de sustrato

El consumo de los diferentes sustratos fue determinado a partir de los sobrenadantes de las muestras obtenidas, guardados a -20 °C hasta el momento de su análisis. La cuantificación de las fuentes de carbono se realizó por cromatografía líquida de alta presión (HPLC) con una columna Aminex HPX-87H (Bio-Rad Laboratories Inc., USA), se ajustaron los parámetros para detectar el consumo de propionato con buena resolución.

Previo al análisis de muestras mediante HPLC, estas se descongelaron y se filtraron empleando un filtro de nylon de tamaño de partícula de 0.2 μm . Se utilizó un equipo de HPLC (Varian ProStar) con detector de índice de refracción (Knauer) y horno 50 °C. Como fase móvil se utilizó una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a una concentración de 5 mM. El flujo de la fase móvil fue de 0.6 mL/min y un



tiempo de corrida de 20 minutos. Se prepararon soluciones estándar en un rango de concentraciones de 5 a 0.01 g/L, estas fueron medidas de igual manera mediante cromatografía HPLC; con estos resultados se elaboró una curva patrón que relaciona la concentración de propionato con el área del pico (mRIU.s). La cuantificación se realizó interpolando los valores obtenidos del análisis de la muestra en la curva estándar explicada anteriormente.

Determinación de la producción de AIA y el consumo de Trp

La concentración de AIA fue determinada igualmente a partir de los sobrenadantes, estos se guardan a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de su análisis. La cuantificación de AIA se determinó espectrofotométricamente a una longitud de onda de 530 nm (Espectro Thermo Scientific, Evolution, USA) utilizando el método de Salkowski. Las muestras de sobrenadante se incubaron durante 30 min en la oscuridad con el reactivo Salkowski (2,4 g de FeCl_3 en 100 mL de H_2SO_4) en una relación 1:1. Para la determinación de las concentraciones de AIA los valores de absorbancia obtenidos fueron extrapolados en una curva patrón de AIA sintético (Sigma & Aldrich). Todos los ensayos fueron realizados por triplicado.

Los resultados de producción de AIA fueron corroborados mediante cromatografía líquida de alta presión (HPLC) con una columna C18 (Waters Inc., USA/ ODS 300 x 4.6 mm 5 μm). Previo al análisis de muestras mediante HPLC, estas se descongelaron y se filtraron empleando un filtro de nylon de tamaño de partícula 0.2 μm . Se utilizó un equipo de HPLC (Varian ProStar) con detector de UV (One Varian ProStar 320 UV/VIS) a una longitud de onda de 280 nm. Como fase móvil se utilizó una mezcla de agua acidulada (ácido acético al 1%) y acetonitrilo en proporción 70:30. El flujo de la fase móvil fue de 1 mL/min y tiempo de corrida de 15 min. Las concentraciones de AIA y Trp se determinaron a través de una curva patrón elaborada con estándares de ambos compuestos en un rango de concentración de 1 a 0.01 g/L.

Los datos experimentales que se reportaron previamente (Castillo-Alfonso *et al.*, 2022), se compilan en la Tabla 1 y sirven como base para el diseño conceptual del proceso.

Tabla 1. Parámetros experimentales para el diseño conceptual del bioproceso (Castillo-Alfonso *et al.*, 2022). Los valores de concentración son los valores finales

Compuesto	Concentración (g/L)	Rendimientos
Propionato	3.08 g/L	$Y_{\frac{X}{S}} = 0.036$
Biomasa	0.1g/L	$Y_{\frac{AIA}{S}} = 0.168$
AIA	0.31 g/L	$Y_{\frac{CO_2}{S}} = 0.795$

X-biomasa, S-substrato



Prueba de crecimiento de plantas

Se hicieron pruebas con el sobrenadante de los cultivos de *Bacillus subtilis*, es decir sin biomasa, obtenidos por Castillo-Alfonso *et al.* (Castillo-Alfonso *et al.*, 2022). Las concentraciones de los productos finales de los cultivos se encuentran en la Tabla 1. Este sobrenadante se ocupó como bioinsumo para el cultivo de plántulas de semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y de lechuga (*Lactuca sativa*) ocupando charolas de germinación cuyos pozos tienen un volumen aproximado de 150 mL. El caldo de cultivo se aplicó siguiendo dos metodologías y estos cultivos se hicieron por duplicado:

1. La inmersión de la semilla en el caldo durante dos horas, posterior a este tiempo se dejaron secar al aire ambiente por un periodo de una hora; se realiza la siembra de las semillas colocando una semilla individual en cada espacio de la charola.
2. Aplicación del extracto de fermentación por aspersión sobre las semillas ya sembradas en la charola de germinación de manera regular hasta alcanzar su crecimiento. La aspersión se llevó a cabo dos veces por día durante una semana.

Para la evaluación del crecimiento de las plántulas un grupo de estas funciona como población control, las cuáles no fueron sometidas al tratamiento. En todos los casos se midió el crecimiento de tallo y raíz como variable determinante para comprobar el efecto del extracto en las plántulas y comparar con resultados cuantitativos entre ambos métodos de aplicación.

Simulaciones para la evaluación técnico-económica

Se utilizó el simulador SuperPro Designer® para la simulación de la producción de ácido indol 3-acético con los parámetros cinéticos de la Tabla 1. Los datos de materias primas para el proceso se muestran en la Tabla 2 y los costos de éstas en la Tabla 3. Los balances de materia y energía se llevaron a cabo para la dimensión de un proceso cuyo lote de producción es de 1000 L de caldo de cultivo. El propionato se consideró como la fuente de carbono a evaluar en el diseño conceptual junto con el triptófano como inductor. Los precios se obtuvieron de la base de datos del simulador y los reportados comercialmente en (<https://es.made-in-china.com>).

Tabla 2. Requerimientos de materias primas para la simulación del bioproceso

Compuesto	Flujo (kg/batch)
Sustratos	
Propionato	5.0
Triptófano	2.0
Sales (medio)	
Nitrato de amonio	0.5
Cloruro de calcio	0.5
Fosfato de potasio dihidrogenado	0.3



Sulfato de magnesio	0.02
Fosfato ácido di sódico	3.20
Cloruro de sodio	0.5
Agua	1000

Tabla 3. Precios de materias primas utilizados en la simulación del bioproceso

Componente	Precio Kg (USD)	Fuente
Propionato	\$4.6 USD/ kg	https://www.chemicalbook.com/manufacturer/hebei-crovell-biotech-455/
Triptófano	\$20 USD/kg	https://www.chemicalbook.com/manufacturer/anhui-rencheng-technology-349/
AIA comercial	\$90 USD/ kg	https://goldbio.com/product/1311/iaa-indole-3-acetic-acid https://www.chemicalbook.com/Price/Indole-3-acetic-acid-1.htm
Agua	\$2.22 USD/m3	https://portal.conagua.gob.mx/Tarifas/Documentos/Agua%20Prieta%20Son%202018.pdf

Los costos de AIA que se encontraron son muy variables, la mayoría son productores chinos. Así que se decidió tomar como referencia el precio mínimo ofrecido por los productores.

Resultados y Discusión

En el diseño de bioprocesos una de las reglas empíricas señala que se debe contemplar que la purificación de los productos de interés puede representar un 80% del costo total del proceso. Ante este escenario, se decidió ocupar el sobrenadante con la presencia de AIA en los caldos de cultivos de *Bacillus subtilis* para el crecimiento de plántulas de jitomate y lechuga por duplicado; la concentración de AIA es la reportada en la Tabla 1. Se hicieron mediciones del tallo y raíz, adicional a un control negativo. En la Figura 1 se pueden leer los obtenidos para el tallo y raíz. Para el control negativo se obtiene un menor tamaño de follaje y raíz con respecto a las que se le adicionó el caldo. Entre las dos pruebas en donde fue utilizado el sobrenadante, del método por aspersión se obtiene un mayor crecimiento en tallo y número de hojas a diferencia del primer método de sumergir las semillas. Adicionalmente, se analizan las características físicas de manera visual de la raíz de cada una de las muestras (ver Figura 2) con el objetivo de comprobar que el ácido indol acético está presente y funciona como bioinsumo ya que lo que propicia el AIA es un desarrollo de raíz fasciculada; aquella que se forma hacia los lados propiciando una mejor asimilación de nutrientes para el crecimiento de las plantas. La formación de raíz fasciculada se presenta en las plántulas de jitomate y lechuga con el extracto agregado por aspersión, se observa la raíz mejor desarrollada, así como un follaje más sano. En el control negativo tenemos el desarrollo de raíz pivotante, un crecimiento menor con respecto al uso del extracto de fermentación. Cabe señalar que el sobrenadante se conservó en medio ambiente evitando la incidencia directa de la luz del sol.

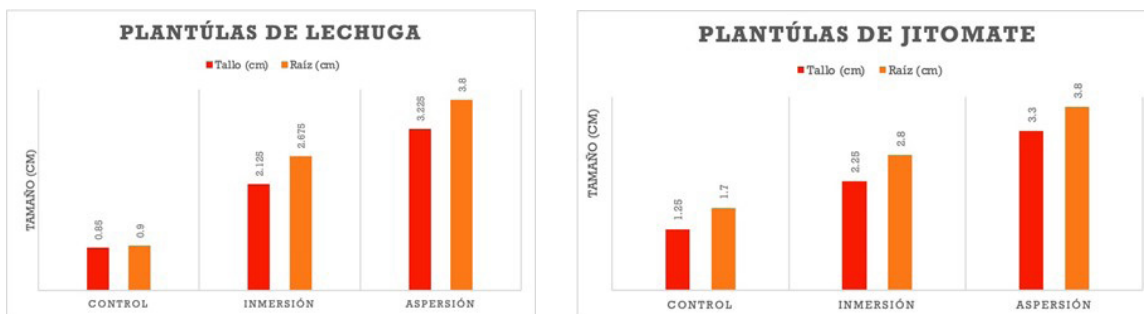


Figura 1. Comparación del crecimiento foliar del control negativo con respecto a los dos métodos de aplicación del extracto en plántulas de jitomate y lechuga

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se puede ver el efecto del sobrenadante de la fermentación conteniendo el AIA como bioinsumo para mejorar el crecimiento de plántulas. Lo que implica que el AIA puede ser comercializado en forma de solución sin necesidad de ser purificado, lo cual representaría un costo adicional al proceso.

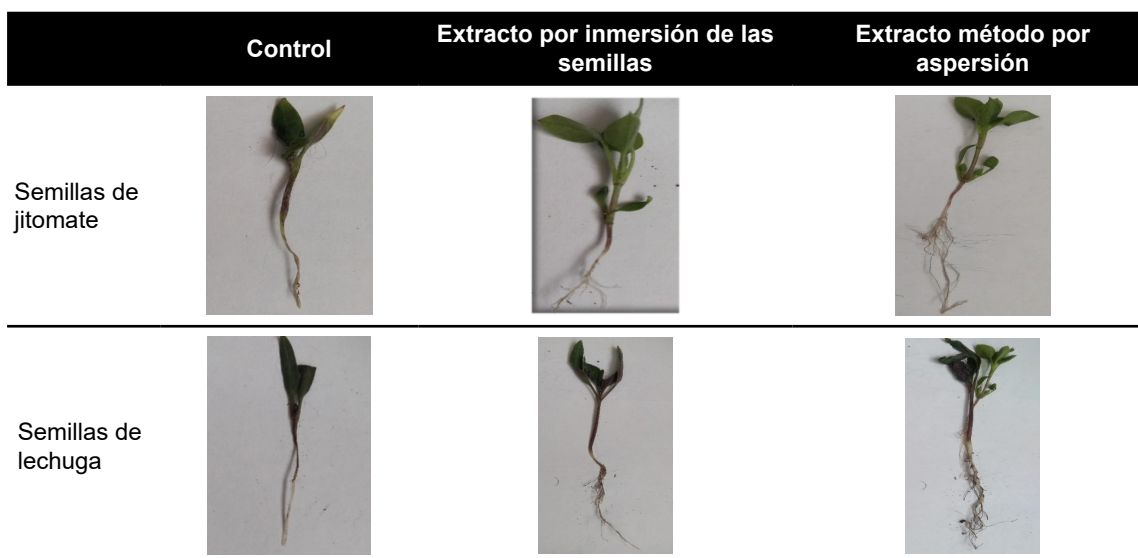


Figura 2. Evidencia del crecimiento de plántulas de tomate y lechuga

Evaluación de la viabilidad técnico-económico de la producción de AIA

Los resultados en el crecimiento de las plantas utilizando el caldo de cultivo se considera como una directriz del diseño conceptual del bioproceso, por lo que para evaluar la factibilidad técnico-económica de la producción de AIA basado en *Bacillus subtilis* W-168 se realizó el diagrama de proceso en SuperPro Designer® mostrado en la Figura 3, donde se representan las tres etapas y corrientes correspondientes del proceso: la etapa río arriba que consiste en la preparación y esterilización de los medios de cultivo, la etapa de fermentación, la etapa de separación de la biomasa suspendida y el almacén del sobrenadante.

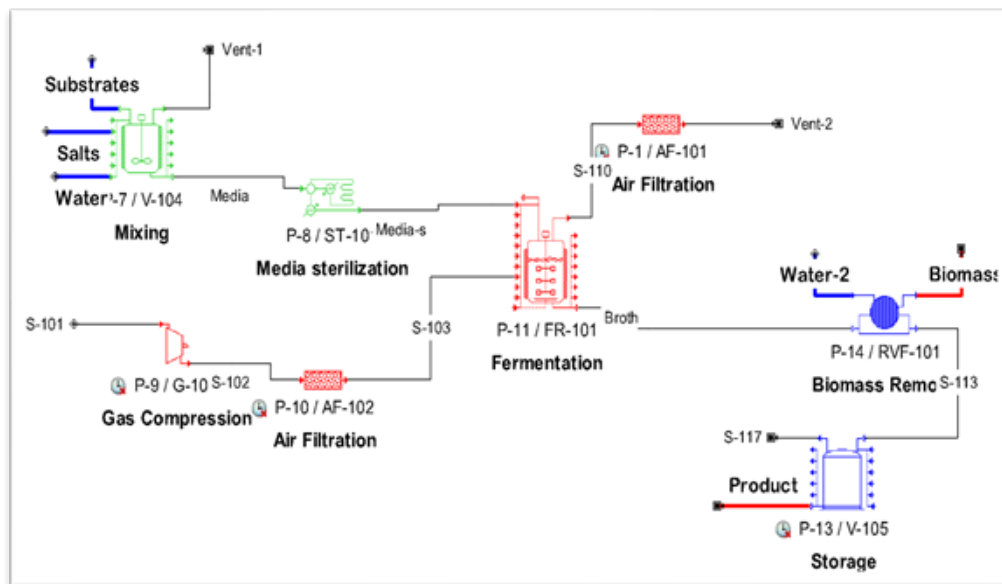


Figura 3. Diagrama de proceso para la producción de ácido indol acético simulado en el software SuperPro Designer®

Para la simulación del bioproceso se consideró la producción de un fermentador que genera un lote de 1000 L que produciría 16.8 kg AIA y que al año se llevarían a cabo 49 lotes. El software permite un análisis técnico y económico del proceso; el análisis técnico especifica costos: equipos, operativos, mano de obra, servicios y materias primas implicadas en el proceso. El biorreactor y el tanque de almacenamiento son los más utilizados durante el proceso, por lo tanto, representan el mayor costo por operación de los equipos utilizados. El costo de producción que se obtiene de la simulación de AIA es de \$24.5 USD/kg, si se compara este valor con el valor comercial promedio presentado en la Tabla 3 (\$390 USD/kg) representa aproximadamente 10%. Este bajo costo está asociado a que el AIA se encuentra en solución y que podría ser aplicado para el crecimiento de las plantas.

En la Tabla 4 se pueden observar los datos obtenidos en el estudio económico, se determinó un total de capital invertido de 12,827,000 USD, un retorno del 18.87% de la inversión en 5 años, un valor presente neto (VPN) de \$4,534,000 considerando una inflación del 7% y una tasa interna de retorno (TIR) del 12.45%.

Tabla 4. Parámetros requeridos para el análisis económico del proceso calculados con el simulador

Total de capital invertido	12,827,000 USD
Costo operativo	2,777,000 USD/yr
Margen bruto	37.76%
Retorno de la inversión	18.87%
Tiempo de recuperación	5 años
Tasa interna de retorno (TIR)	12.45%
Valor presente neto VPN (interés del 7.0%)	4,534,000
Costo unitario de AIA	24.5 USD/kg



Con base en el diseño del bioproceso propuesto, la producción de AIA como un bioinsumo para el crecimiento de plantas se puede considerar factible técnica y económicamente. Es importante comparar que, en esta propuesta de diseño, el producto final es una solución de AIA a una concentración de 0.31 g/L, a diferencia del producto comercial el cual se encuentra purificado; sin embargo, la presentación de AIA en solución puede reducir los costos de producción de alimentos ya que su costo se reduce de manera considerable.

Actualmente no existe un proceso de producción de AIA basado en microorganismos. Los esfuerzos que se han llevado a cabo son para escalar su producción en fermentadores de 100 L a nivel planta piloto, cultivando la levadura *Rhodosporidiobolus fluvialis* DMKU-CP293 y utilizando triptófano, pero no se reporta su factibilidad económica (Bunsangiam, S. *et al.*, 2021).

Conclusiones

En los últimos años se ha incrementado el interés por producir ácido indol acético para promover el crecimiento de plantas de una manera sustentable y generar productos orgánicos con el objetivo de disminuir el impacto en los suelos. La producción de esta auxina se realiza actualmente por síntesis química y una alternativa a esta producción es utilizar bacterias promotoras de crecimiento como *Bacillus subtilis*.

Actualmente existen esfuerzos para cultivar cepas del género *Bacillus* y producir AIA utilizando triptófano como inductor y fuentes de carbono como glucosa, propionato o sustratos de desecho industrial como soya. Sin embargo, debido al precio del triptófano se podría cuestionar su uso como fuente de carbono, por lo que es importante evaluar un diseño que considere estos costos.

En este trabajo, en particular, se evaluó, por medio de un simulador de bioprosesos, un diseño para la producción de AIA cultivando *Bacillus subtilis* y empleando un medio definido con triptófano y propionato. La alternativa de diseño resultante considera que el AIA puede venderse como una solución, a diferencia del producto concentrado, y que esto puede implicar un costo menor para el consumidor comparado con el que se tiene en el mercado. Por lo tanto, este análisis incentiva la optimización de la producción microbiana de AIA utilizando *Bacillus subtilis*. Como perspectiva se podría considerar no separar la biomasa ya que el microorganismo no se modifica genéticamente y evaluar el efecto en el crecimiento de las plantas.

Referencias

Anguiano-Cabello, J. C., Flores-Olivas, A., Olalde-Portugal, V., Arredondo-Valdés, R., & Laredo-Alcalá, E. I. (2019). Evaluación de cepas de *Bacillus subtilis* como promotoras de crecimiento vegetal. *Revista Bio Ciencias*, 6, 13-pág. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.e418>



- Alfonso, F. C., Viguera-Ramírez, G., Rosales-Colunga, L. M., del Monte-Martínez, A., & Hernández, R. O. (2021). Propionate as the preferred carbon source to produce 3-indoleacetic acid in *B. subtilis*: comparative flux analysis using five carbon sources. *Molecular Omics*, 17(4), 554-564. <https://doi.org/10.1039/d1mo00039j>
- Bunsangiam, S., Thongpae, N., Limtong, S., & Srisuk, N. (2021). Large scale production of indole-3-acetic acid and evaluation of the inhibitory effect of indole-3-acetic acid on weed growth. *Scientific Reports*, 11(1), 13094. DOI:10.1038/s41598-021-92305-w
- Castillo-Alfonso, F., Quintana-Menéndez, A., Viguera-Ramírez, G., Sales-Cruz, A. M., Rosales-Colunga, L. M., & Olivares-Hernández, R. (2022). Analysis of the propionate metabolism in *Bacillus subtilis* during 3-indolacetic production. *Microorganisms*, 10(12), 2352. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122352>
- Dayan, F. E., & Duke, S. O. (2014). Natural compounds as next-generation herbicides. *Plant physiology*, 166(3), 1090-1105. DOI: 10.1104/pp.114.239061
- Dolan, S. K., Wijaya, A., Geddis, S. M., Spring, D. R., Silva-Rocha, R., & Welch, M. (2018). Loving the poison: The methylcitrate cycle and bacterial pathogenesis. *Microbiology (United Kingdom)*, 164(3), 251–259. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000604>
- Duca, D., Lorv, J., Patten, C. L., Rose, D., & Glick, B. R. (2014). Indole-3-acetic acid in plant–microbe interactions. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 106, 85-125. DOI: 10.1007/s10482-013-0095-y
- Duke, S. O. (2018). *Herbicide-resistant crops: Agricultural, economic, environmental, regulatory, and technological aspects*. Crc Press.
- Gerwick, B. C., & Sparks, T. C. (2014). Natural products for pest control: an analysis of their role, value, and future. *Pest Management Science*, 70(8), 1169-1185. DOI: 10.1002/ps.3744
- Higuera Ramírez, A. M., & Restrepo Rivillas, A. M. (2019). *Desarrollo de un bioinsumo agrícola con base en un consorcio de Bacillus subtilis-Pseudomonas sp* (tesis de grado, Universidad EAFIT). <http://hdl.handle.net/10784/15882>
- Kaur, P., & Purewal, S.S. (2019). Biofertilizers and Their Role in Sustainable Agriculture. En Giri, B., Prasad, R., Wu, Q.S., Varma, A. (eds) *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment . Soil Biology*, vol 55. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_12
- Kircher, B., Woltemate, S., Gutzki, F., Schlüter, D., Geffers, R., Bähre, H., & Vital, M. (2022). Predicting butyrate-and propionate-forming bacteria of gut microbiota from sequencing data. *Gut Microbes*, 14(1), 2149019. DOI: 10.1080/19490976.2022.2149019
- Kumari, S., Prabha, C., Singh, A., Kumari, S., & Kiran, S. (2018). Optimization of indole-3-acetic acid production by diazotrophic *B. subtilis* DR2 (KP455653), iso-



- lated from rhizosphere of *Eragrostis cynosuroides*. *International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences*, 7(2), 20-27. DOI:10.18178/ijpmbs.7.2.20-27
- Lee, J. C., & Whang, K. S. (2016). Optimization of indole-3-acetic acid (IAA) production by *Bacillus megaterium* BM5. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(5), 461-468. DOI:10.7745/KJSSF.2016.49.5.461
- Mageshwaran, V., Inmann, F. & Holmes, L. D. 2014. Growth kinetics of *Bacillus subtilis* in lignocellulosic carbon sources. *International Journal of Microbiology Research*, 6(2), 570-574. https://www.researchgate.net/publication/268334859_Growth_kinetics_of_Bacillus_subtilis_in_lignocellulosic_carbon_sources
- Patten, C. L., & Glick, B. R. (1996). Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian journal of microbiology*, 42(3), 207-220. DOI: 10.1139/m96-032
- Patten, C. L. (2022). Rhizocompetence traits regulated by the transcription factor TyrR in plant-associated bacteria. *Rhizosphere*, 23, 100577. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100577>
- Pérez Cruz, O. A. (2020). La Competitividad y la seguridad alimentaria en México. *Economía Coyuntural*, 5(1), 119–142. <http://www.scielo.org.bo/scielo.php>
- Pollmann, S., Müller, A., Piotrowski, M., & Weiler, E. W. (2002). Occurrence and formation of indole-3-acetamide in *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, 216, 155-161. DOI: 10.1007/s00425-002-0868-4
- Priya, A. K., Alagumalai, A., Balaji, D., & Song, H. (2023). Bio-based agricultural products: a sustainable alternative to agrochemicals for promoting a circular economy. *RSC Sustainability*, 1(4), 746-762. DOI: 10.1039/D3SU00075C
- Quintana, L. A. (2022). *Evaluación de la producción de ácido indolacético en Bacillus subtilis utilizando modelos metabólicos a escala genómica y algoritmos de optimización multiobjetivo*. México: UAM, Unidad Cuajimalpa, División de Ciencias Naturales e Ingeniería. <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/1124>
- Sarmiento-López, L. G., López-Meyer, M., Maldonado-Mendoza, I. E., Quiroz-Figueroa, F. R., Sepúlveda-Jiménez, G., & Rodríguez-Monroy, M. (2022). Production of indole-3-acetic acid by *Bacillus circulans* E9 in a low-cost medium in a bioreactor. *Journal of bioscience and bioengineering*, 134(1), 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2022.03.007>
- Su, Y., Liu, C., Fang, H., & Zhang, D. (2020). *Bacillus subtilis*: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial cell factories*, 19, 1-12. DOI:10.1186/s12934-020-01436-8
- Vega-Celedón, P., Canchignia Martínez, H., González, M., & Seeger, M. (2016). Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales*, 37(Supl. 1), 33-39. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000500005&lng=es&tlng=es.



- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>
- Widawati, S. (2020). Isolation of Indole Acetic Acid (IAA) producing *Bacillus siamensis* from peat and optimization of the culture conditions for maximum IAA production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 572, No. 1, p. 012025). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/572/1/012025
- Wu, H., Yang, J., Shen, P., Li, Q., Wu, W., Jiang, X., ... & Qi, F. (2021). High-level production of indole-3-acetic acid in the metabolically engineered *Escherichia coli*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(6), 1916-1924. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c08141
- Yamaguchi, I., Cohen, J. D., Culler, A. H., Quint, M., Slovin, J. P., Nakajima, M., ... & Sakagami, Y. (2010). *Plant Hormones Comprehensive Natural Products II, Chemistry and Biology*. Springer Dordrecht
- Zhao Y. (2010). Auxin biosynthesis and its role in plant development. *Annual review of plant biology*, 61, 49–64. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112308>

Experiencias en el uso de bioinsumos para la salud y la regeneración ecosistémica y comunitaria

Sergio Arturo Roblada Mancilla^{1,2}, Leonel Alejandro Gavilanes Santillán^{1,3}, María de Lourdes González Gallegos^{1,4}, Rodolfo González Figueroa^{1,5}, Ezequiel Cárdenas Rodríguez^{1,6} y Alan Heinze^{7*}

¹Especialista PIES AGILES, CIATEJ-Conahcyt, México

²COA Manantlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco

³COA Francisco I. Madero, Tepic, Nayarit

⁴Grupo Bioinsumos Talpa, Talpa de Allende, Jalisco

⁵Grupo de Agricultura Orgánica de La Ciénega, El Limón, Jalisco

⁶La Casa del Maíz, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco

⁷Investigador por México, Biotecnología Industrial, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Zapopan, Jalisco

*Autor de correspondencia: aheinze@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

autosuficiencia alimentaria, bioinsumos, prácticas alternativas, programas educativos, transición agroecológica

Una de las prácticas agrícolas alternativas más populares y asequibles es el uso de bioinsumos, productos a base de compuestos biológicos y minerales con la capacidad de mejorar la productividad, calidad y salud de los cultivos y minimizar los impactos ambientales. Recientemente el gobierno de México ha impulsado la investigación, capacitación, información y capacidad de producción para dar auge a los bioinsumos y avanzar la transición agroecológica y la autosuficiencia alimentaria. En este artículo se recuperan y sistematizan las experiencias de cinco especialistas, usuarios y promotores de bioinsumos, quienes coincidieron en el programa educativo PIES AGILES (2021-2023) y el contexto sociopolítico de la sustitución y eliminación del herbicida glifosato en México. A modo de testimonio, los especialistas narran su experiencia en el manejo agroecológico a base de bioinsumos y libre de agrotóxicos, la regeneración del suelo y la producción de alimentos nutritivos y sanos. Los bioinsumos de elaboración propia brindan autonomía, un ahorro económico y manejo eficiente, cuidan la salud de las personas y el ambiente, y promueven la comunalidad. La práctica de bioinsumos también demanda tiempo, trabajo y organización, así como paciencia, compromiso y convicción: los bioinsumos representan y requieren un enfoque de manejo integral y sostenible. Con base en estas experiencias de

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
245-261. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12774400>

Recibido: 15 abril 2024
Revisado: 27 mayo 2024
Aceptado: 4 julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



praxis y principios agroecológicos, se reafirma que la coproducción y reproducción de bioinsumos cuida y regenera los ecosistemas y comunidades, lo que constituye un paso fundamental en la transición agroecológica y la transformación de los sistemas agroalimentarios.

Introducción

La sustitución de prácticas e insumos agrícolas convencionales por prácticas alternativas sostenibles se considera un paso fundamental en la transición agroecológica y la transformación de los sistemas agroalimentarios (Gliessman, 2015). Una de las prácticas alternativas más populares y de rápida adopción es el uso de bioinsumos agrícolas, los cuales son tan heterogéneos en su composición y aplicación como en su procedencia, pues derivan de la enorme diversidad de biopreparados de la agricultura tradicional (Mamani de Marchese y Filippone, 2018). Los bioinsumos son productos agrícolas basados en compuestos y extractos de plantas, animales, minerales, microorganismos y residuos agrícolas, con la capacidad de mejorar la productividad, calidad y salud de los cultivos vegetales y su medio, y de minimizar los impactos ambientales (adaptado de Mamani de Marchese y Filippone, 2018).

En México el uso de bioinsumos tiene su origen en la agricultura y los conocimientos tradicionales (Pérez Sánchez *et al.*, 2014). Ha habido gran interés en la producción biotecnológica y la aplicación de bioinsumos desde los 70 y 80, especialmente de biofertilizantes a base de microorganismos; posteriormente a partir de los 90 y con la integración del marco de la sustentabilidad se vio un aumento continuo en la demanda de abonos orgánicos, particularmente de fermentados líquidos (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010). Recientemente, tras el primer decreto presidencial sobre la sustitución y eliminación del herbicida glifosato en México (Secretaría de Gobernación, 2020), se movilizó a las dependencias y programas federales a impulsar la investigación (Conahcyt, 2024), los programas de formación y educación (Toledo & Argueta, 2024), el apoyo a productores/as y la capacidad de producción de bioinsumos a nivel nacional para avanzar la transición agroecológica y la autosuficiencia alimentaria (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022a). Los bioinsumos son cada vez más asequibles y actualmente se cuenta con una buena cantidad de publicaciones, información y material de apoyo disponible (Coutiño-Puchuli *et al.*, 2023; SADER, 2022b). Más aún, se debe también documentar y sintetizar la experiencia de las y los usuarios y beneficiarios, tanto agricultores/as como técnicos que experimentan y trabajan directamente con bioinsumos.

En este artículo se recuperan experiencias, evidencias y reflexiones en torno a los bioinsumos agrícolas de elaboración propia, esto es, aquellos preparados, aplicados y propagados por los mismos productores/as. Se presentan los testimonios de cinco especialistas (autores de este artículo) en bioinsumos, quienes participaron y coinci-



dieron en el Programa Interinstitucional de Especialidad en Soberanías Alimentarias y Gestión de Incidencia Local Estratégica (PIES AGILES) 2021-2023, un programa educativo¹ que surgió en el contexto sociopolítico del mencionado decreto presidencial sobre glifosato. Durante el programa, estos cinco especialistas desarrollaron un proceso de investigación-acción participativa junto con sus comunidades de aprendizaje (COA) en distintas localidades y territorios de Jalisco y Nayarit (Heinze, 2024).

A continuación, se narran, sistematizan y resumen estas experiencias, incluyendo los aprendizajes comunes de los beneficios y desafíos en la elaboración y aplicación de bioinsumos. Como se aprecia en esta recopilación de textos y voces, la sustitución de fertilizantes y plaguicidas químicos (entre otros agroquímicos industriales convencionales) por bioinsumos alternativos va más allá de un simple reemplazo de insumos o materiales: aquí se propone que la (re)producción de bioinsumos en el campo busca cuidar y regenerar nuestros ecosistemas y comunidades.

Experiencias de la Casa Jalisco-Nayarit en la producción y uso de bioinsumos

1) La Casa del Maíz en San Juan Evangelista, Tlajomulco, Jalisco (Ezequiel C. R.)

Somos un grupo de productores, transformadores y comercializadores de maíz, también somos una familia agroecológica que nos dedicamos al rescate, conservación y aprovechamiento del maíz criollo.

La historia de los bioinsumos en la Casa del Maíz data de hace 15 años, cuando nos vinculamos con una cooperativa estatal llamada RASA, la Red de Alternativas Sustentables Agropecuarias, quienes nos invitaron a participar en un taller sobre bioinsumos. Ahí comprendimos que al enseñarse uno a preparar bioinsumos y hacer estos procesos, te da autonomía la capacidad de aprender y de hacer todos los insumos agrícolas que vas a utilizar en tus cultivos. Nosotros aprovechamos desde las compostas, los esquilmos e incluso aquí en la Casa del Maíz tenemos baños secos donde aprovechamos los sólidos y los líquidos como materia prima para generar bioinsumos. Ya tenemos muchos años en esta labor, primero en el proceso de hacerlos, después en aplicarlos y, por último, en verificar que prácticamente sí nos están funcionando para todo el ciclo de siembra que hacemos.

Entre los bioinsumos que utilizamos normalmente está el supermagro, un biopreparado a base de macro y micronutrientes, sales minerales, estiércol de vaca, melaza, leche y agua, que lleva una fermentación en la que se reproducen los microorganismos. Se usa en la hortaliza, el maíz y prácticamente en todo lo que sembramos. También ponemos a fermentar la orina humana, que tras un proceso bondadoso de 28-30 días se obtiene sulfato de amonio, el nitrógeno que requerimos y aplicamos en la parcela.

¹ Convocatoria del CIATEJ con información básica sobre el programa: https://youtu.be/8MKb_lgExs4



A su vez, hacemos insecticidas a partir de plantas silvestres, algunas más venenosas que otras. Por ejemplo, preparamos una maceración de toloache e higuerrilla y otra maceración de ajo, cebolla y chile, todo eso lo mezclamos para combatir el gusano cogollero, y le agregamos melaza, baba de nopal o sábila como adherente. Asimismo, utilizamos el nijayote², aprovechamos que ponemos nixtamal aquí en la Casa del Maíz prácticamente todos los días, y en la temporada de siembra lo aplicamos también contra el gusano cogollero. Por otro lado, también hacemos tés o biopreparados de frutas maduras. Elaboramos el caldo sulfocálcico y el caldo bordelés, o bien un té de ajo o cola de caballo con propiedades antimicóticas. La preparación de estos bioinsumos nos mantiene activos y nos fortalece en los procesos agroecológicos.

Los bioinsumos nos ayudan a bajar los costos de producción, a no depender de las empresas que venden insumos, nos dan autonomía, nos permite saber qué es lo que estamos aplicando (en el mercado hay productos que no son lo que aparentan). Otras ventajas incluyen regenerar el suelo y especialmente su microbiota, no contaminar más y tener alimentos más sanos y nutritivos. Cabe resaltar que estos bioinsumos se hacen en grupo, en organización y en familia: en esta labor se hace comunidad. Para mí este proceso significa, más que nada, los nutrientes para los alimentos que vamos a consumir. Esto es, producir sanamente para alimentarnos sanamente.



Figura 1. Los bioinsumos se relacionan con una alimentación y comunidad sana

Fuente: propia

2) Experiencias campesinas en el sur de Jalisco (Sergio Arturo R. M.)

Desde joven he sido parte de la resistencia al uso de agroquímicos, que tanto daño han causado a las y los productores, flora y fauna, suelos, mantos acuíferos, ríos, arroyos y demás cuerpos de agua en las comunidades. Los plaguicidas químicos para controlar hierbas y plagas en monocultivos causan enfermedades a quienes los aplican y también a sus familiares. En mi región sobresale el caso de intoxicación de cientos de niños/as y jóvenes con agrotóxicos que afectan su salud y desarrollo psicológico, en algunas localidades con un catálogo de 12 plaguicidas distintos en su

² Lavaza o agua residual del maíz nixtamalizado.

orina, alertando a la población de los efectos nocivos de estos productos a la salud humana (Comisión Estatal de Derechos Humanos Jalisco, 2021). Con base en esta evidencia nos encontramos en la búsqueda de estrategias y proyectos demostrativos que nos ayuden a reducir y/o eliminar por completo el uso de agrotóxicos, y de manera similar encontrar alternativas a los sistemas productivos tipo monocultivos que tanto demandan y dependen de estos productos.

De manera coordinada con la Dirección de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, investigadores del Departamento de Ecología y Recursos Naturales del Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, profesionistas de las comunidades indígenas, quienes conformamos la COA Manantlán en el PIES AGILES, mi familia y productores de la comunidad de bienes comunales de Cuzalapa, Cuautitlán de García Barragán, fomentamos el diálogo y la puesta en marcha de estrategias piloto de transiciones agroecológicas hacia una producción más sostenible y amigable con el medio ambiente, acorde con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, s.f.). Actualmente impulsamos la elaboración y aplicación de bioinsumos orgánicos y prácticas tradicionales-ancestrales en los cultivos del sistema milpa, policultivos y cafetales, donde utilizamos más de diez productos orgánicos amigables con el medio ambiente para la nutrición y el control de plagas y enfermedades, tales como: jabón potásico, biofósforo y 8-24, hidrolizado de leonardita, bioles, enmelazado (urea y nitrato de potasio), caldo sulfocálcico, sulfopotásico, microorganismos de montaña, hongos entomopatógenos y agronosodes (agrohomeopatía), lo más innovador y económico.



Figura 2. Existe una gran diversidad de bioinsumos adaptables a distintos contextos y las necesidades de los/las productores/as

Fuente: propia

A nivel familiar se han establecido áreas demostrativas y sitios experimentales en escuelas y comunidades. Trabajamos con huertos de traspatio y huertos escolares integrales bajo el método biointensivo. Muestra de ello es el predio Agroecológico RAMADA, ubicado en Corral de Piedra, Casimiro Castillo, el huerto integral en la



Escuela Primaria Casimiro Castillo en Ahuacapán, Atlán de Navarro y varios huertos integrales en Cuzalapa, El Reparo y Chancol, así como el Centro de Capacitación y Elaboración de Bioinsumos Orgánicos en Patitas, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco.

Como resultado de la estrategia piloto se ha logrado un manejo a base de bioinsumos –descartando por completo el uso de agrotóxicos– y se presume la reducción de costos de hasta un 70% de inversión tanto en una hectárea de aguacate y limón como en una hectárea de maíz. Estimamos que, si al menos la mitad de los productores adoptaran estas estrategias, se cumpliría el objetivo de alcanzar la autosuficiencia y la soberanía alimentaria porque se establecería una producción agrícola sostenible y culturalmente adecuada, mediante el uso de prácticas e bioinsumos agroecológicos que resulten seguros para la salud humana, la diversidad biocultural y el ambiente.

3) Producción de bioinsumos para el cultivo sustentable de caña de azúcar en Francisco I. Madero, Nayarit (Leonel Alejandro G. S.)

Somos una COA que lleva el mismo nombre de la localidad donde trabajamos, Francisco I. Madero (Puga), en el municipio de Tepic, Nayarit, conformada actualmente por 20 productores de caña de azúcar de la comunidad, personal técnico del programa Producción para el Bienestar de la SADER (MICI caña Tepic Región #29) y mi persona como especialista del PIES AGILES.

El grupo ha trabajado con bioinsumos desde hace más de tres años, iniciando aproximadamente en el 2020 con el apoyo del técnico de Producción para el Bienestar. Para el 2021, año en que inició el PIES AGILES, nos vinculamos para iniciar los trabajos del programa en donde diseñamos e implementamos un Plan de Acción Territorial, en el cual se plasmaron acciones y prácticas agroecológicas para la elaboración y aplicación de diferentes bioinsumos en las parcelas de los productores de caña de azúcar de la COA. Para esto realizamos talleres participativos y demostraciones en donde los participantes se involucraban y aprendían el proceso de elaboración de los siguientes bioinsumos: caldo sulfocálcico, herbicida a base de vinagre, reproducción y activación de microorganismos de montaña, supermagro básico, supermagro mejorado y bayfolan³, entre otros.

Posteriormente, trabajamos en la aplicación de los bioinsumos. De manera colectiva nos programamos para que todo el grupo apoyara en cada una de las parcelas, un trabajo colectivo que fomentó la comunalidad. Se inició con la aplicación del caldo sulfocálcico al 10% para el manejo de la plaga del gusano barrenador, que tenía mucha incidencia en las parcelas de los productores. El herbicida a base vinagre se aplicó en concentraciones cada vez mayores hasta un 10%. Los microorganismos de montaña se aplicaron al 20% para la recuperación de la microbiología del suelo. Para la nutrición y manejo de plagas y

³ Producto comercial: abono foliar líquido.

enfermedades se aplicaron bacterias, hongos y levaduras. Los supermagros y el bayfolan® también se aplicaron al 20%, principalmente para la nutrición y desarrollo de las plantas.

Dada la cultura de manejo convencional de muchos años de los productores, no se logró sustituir completamente el uso de fertilizantes y plaguicidas químicos. Por ejemplo, no funcionó el herbicida a base de vinagre que elaboramos para el manejo de las arvenses, principalmente el zacate peludo (como se conoce localmente), que compite con la caña de azúcar por su rápida reproducción y crecimiento. Sin embargo, al implementar el Plan de Acción Territorial los productores aprendieron a elaborar y aplicar estos bioinsumos e identificaron algunos beneficios de los supermagros y el abono foliar líquido, como fue un mejor amacollamiento y crecimiento de la caña de azúcar. En el caso del gusano barrenador, el uso del caldo sulfocálcico obtuvo excelentes resultados disminuyendo considerablemente su incidencia en las parcelas. Además, cabe resaltar que hubo productores que incrementaron su rendimiento en comparación con el ciclo de cultivo anterior de manejo convencional: de 132 a 142 ton en una parcela de 1.5 ha, y de 25 a 36 ton en el caso de una parcela de 2 ha en rehabilitación (con caña resoca de múltiples cortes y rala).



Figura 3. Encuentro e intercambio de saberes sobre bioinsumos entre productores/as y técnicos/as de caña de azúcar de Nayarit y Jalisco (mayo 2023)

Fuente: propia

Estos bioinsumos se usan principalmente para poder transitar hacia un cultivo de caña más sustentable en la comunidad. Seguiremos sumando a más productores a la COA, su participación ha ido incrementando, todo con el objetivo de lograr el escalamiento agroecológico que nos planteamos originalmente en el Plan de Acción Territorial. Las ventajas de usar estos productos radican en sus bajos costos de elaboración y su carácter orgánico, además de que ayudan a la recuperación de la salud del suelo y no hacen daño a la salud de los productores y de los agroecosistemas, como hemos observado con los agrotóxicos.



4) Producción colectiva de bioinsumos en la Sierra Occidental de Jalisco (Ma. de Lourdes G. G.)

Mi acercamiento a la agricultura y las formas de producción sustentables comenzaron posterior a mi formación académica, pues, aunque no haya estudiado una ingeniería los caminos de la vida me fueron llevando a aprender a trabajar la tierra con técnicas agroecológicas.

Es en 2022, desde mi participación con el PIES AGILES, que comenzamos a trabajar con la COA Bioinsumos Talpa, un grupo de seis hombres y cuatro mujeres, para fortalecer las prácticas de producción de bioinsumos que ya venían realizando desde el 2018, identificar otras problemáticas a las que se enfrentaban y proponer acciones que promovieran la agroecología.

La COA Bioinsumos Talpa se ubica en el municipio de Talpa de Allende, en la región de la Sierra Occidental de Jalisco, la cual se encuentra en el eje Neovolcánico. Le acompañan grandes manantiales y la cuenca hidrográfica Río Ameca. Su geografía hace que sea un territorio con gran biodiversidad y a la vez una zona vulnerable debido a la explotación de los recursos naturales por las actividades agropecuarias intensivas, los monocultivos y la tala ilegal, entre otros.

Bioinsumos Talpa es un grupo de productores y productoras de maíz, café, hortalizas, huertas frutales (guayaba, limón, aguacate) y ganadería que, a partir de una serie de capacitaciones para la producción de bioinsumos que estuvo impartiendo el Paisaje Biocultural de Sierra Occidental de Jalisco (un modelo de gestión territorial reconocido por el Gobierno del Estado de Jalisco en 2020)⁴, decidió seguir trabajando de forma colectiva con el objetivo de elaborar sus propios bioinsumos para las actividades agropecuarias que desarrollan y de esta forma reducir el uso de los agroquímicos, el deterioro del suelo y los costos de producción.



Figura 4. Producción de composta (izq.) y de microorganismos de montaña (fase líquida) (der.) en la biofábrica de Bioinsumos Talpa

Fuente: propia

⁴ Ver nota informativa de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) en <https://sema-det.jalisco.gob.mx/noticias-referencias/presenta-sema-det-propuestas-de-ley-en-el-congreso>



La producción de bioinsumos incluye compostas, bioles, caldo sulfocálcico, caldos minerales, supermagro, harina de huesos, reproducción de microorganismos de montaña y también cepas aisladas de microorganismos como los hongos *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* y *Trichoderma* y la bacteria *Bacillus thuringiensis*, los cuales les han servido para combatir plagas y enfermedades, nutrir suelos y fortalecer sus cultivos, tratando de aprovechar los recursos locales con los que cuentan y los residuos de sus actividades agropecuarias.

A través de estos seis años de experimentación en la elaboración y uso de bioinsumos se han fortalecido los saberes del grupo y los objetivos de la transición agroecológica: se han dejado de usar insecticidas y fungicidas (plaguicidas químicos) y se ha reducido en un 30% el uso de fertilizante químico, además de estar contribuyendo a la recuperación de la fertilidad del suelo con el uso de compostas y microorganismos de montaña.

Las cepas de microorganismos han servido mucho para tratar plagas en huertas frutales de guayaba, café, limón y aguacate. Por otra parte, el uso de consorcios microbianos provenientes de suelos saludables de la montaña ha contribuido a mejorar la fertilidad del suelo, fortalecer los cultivos y reducir las plagas y enfermedades de los cultivos.

Las y los integrantes de Bioinsumos Talpa se han beneficiado con el uso de bioinsumos en sus parcelas, y han compartido sus resultados con otras personas. Actualmente, además de comercializar los bioinsumos como una forma de sostener el proyecto, brindan asesoría a otros productores en el manejo de parcelas con bioinsumos. Sin duda, el uso de bioinsumos en las actividades agropecuarias es una práctica agroecológica que se debería fortalecer más como una alternativa viable en la regeneración de los suelos, la salud humana y de los ecosistemas.

5) Grupo de Agricultura Orgánica de La Ciénega, Municipio en transición agroecológica El Limón, Jalisco (Rodolfo G. F.)

Somos un grupo de productores, campesinos y activistas agroecológicos que, desde 1997, comenzamos a practicar una agricultura sin pesticidas, con nuestros propios insumos, saberes locales y semillas nativas. Fue tras un taller impartido en nuestra comunidad por el consultor internacional Jairo Restrepo que comenzamos a elaborar bocashi, supermagros, caldos minerales, biorepelentes, microorganismos de montaña, lixiviados, hidrolizados, agroplus y tés, entre otros más. Primero fue como experimentación para aplicar en pequeñas superficies. Enseguida cuando comenzamos a familiarizarnos nosotros y el suelo con los bioinsumos comenzamos a usarlos en áreas y superficies mayores.

Ahora, luego de poco más de 20 años, tenemos parcelas con suelos que tienen más de dos décadas sin aplicación de agrotóxicos. Los suelos se han regenerado y sentimos que nosotros también. El suelo es un reflejo de la sociedad. En la medida



que el suelo mejora también mejora con él no sólo nuestro cultivo, también nuestro entorno y la familia, la comunidad.

Como parte de las actividades cotidianas en la producción, están la incorporación de materia orgánica y uso de abonos verdes como la *Mucuna* y *Canavalia*, que siempre se asocian a la milpa. Hemos logrado reestablecer la materia orgánica de nuestras tierras. Así, los cultivos crecen más sanos y menos enfermizos; por lo tanto, los bioinsumos que aplicamos se aprovechan mejor ya que la microbiología de los suelos se encuentra en buen estado.

A lo largo de todo este tiempo hemos aprendido de errores y compartires. Al principio, como todo, tuvimos algunos inconvenientes con las dosis de aplicación, con las fermentaciones y los olores del supermagro. Con el tiempo fuimos mejorando y refinando nuestra técnica y nuestro olfato. Se aprende haciendo. El hacer es la mejor forma de aprender. Ahora no sólo producimos en nuestras tierras de manera orgánica hortalizas, maíz, frutales, caña, frijol cacahuete, melón, etc., también damos talleres y cursos y enseñamos a campesinos de toda la región a que hagan sus propios bioinsumos con sus recursos, capacidades, materiales disponibles e incitamos al rompimiento de la dependencia.

Hemos logrado conectar y articular con mucha gente gracias a los intercambios, las ferias y encuentros que organizamos. Así, organizados, hemos podido conseguir insumos más baratos. Por ejemplo, hacer adquisiciones de góndolas enteras de leonardita traída de la región carbonífera de Coahuila para hidrolizar y mejorar la nutrición de los cultivos y los suelos, impulsando fuertemente la transición. Hemos logrado bajar los costos de producción y padecer menos las crisis económicas.

Sabemos que elaborar nuestros propios abonos orgánicos implica un cambio de actitud y conlleva un acto de rebeldía sistémica y política, pues rompe un patrón histórico de sometimiento técnico-dependiente impuesto desde la revolución verde y refinado por el sistema alimentario corporativo que a donde llega socava, erosiona, secuestra, degrada, devasta, acapara e impone la desmemoria cultural como patrón dominante.

Pero hacer abonos nos despierta la memoria. Recolectar mierda de vaca del vecino, pedirle el suero que le sobra a doña Félix, recoger las cenizas del horno del panadero don Juan, ir por los huesos a la carnicería de Luis y así reunir materiales locales para hacer nuestros propios abonos orgánicos implica enlazamiento social, cohesión, comunicación e integración social. Los tejidos sociales se ven favorecidos a nivel comunidad. Pero si nos clavamos al suelo, las redes micorrícicas también se expanden. Hemos podido entender que la agricultura orgánica es un acto de regeneración social, pero también en la dimensión biológica es un proceso de integración.

Nadie elabora un bioinsumo de manera aislada. Casi que forzosamente la práctica de elaboración de abonos orgánicos nos motiva el enlace comunitario. Pero, sobre todo, nos despierta la creatividad e innovación y constantemente hacemos eso que



llaman en la academia diseños experimentales. Aplicando tal o cual fermento, con o sin microorganismos, bajando o subiendo dosis, enriqueciendo con minerales, adicionado con aminoácidos a un surco sí a otro no, foliar o vía riego, etc. Maravilloso es el proceso que nos permite empoderarnos y crear resiliencia, adaptación y mejora. Biopoder, dice el abuelo Sebastião Pinheiro.

Contamos en nuestra comunidad con más de 30 productores elaborando por lo menos dos bioinsumos. Hay cuatro centros de producción familiar de biofertilizantes diversos. Un joven tiene su laboratorio para producir *Trichogramma* y *Trichoderma*, que vende a los productores cañeros y maiceros, abonando a la transición agroecológica. Las escuelas primarias todas cuentan con huertos escolares, donde los alumnos aprenden técnicas diversas de conservación de suelos y abonos orgánicos. Hay dos huertos comunitarios, en uno de ellos se comienza a establecer un área común para aprender a elaborar bioinsumos y aplicarlos en el huerto. Nuestro ejido ha decidido invertir en la producción de abonos. La preparatoria se declaró agroecológica y ahora cuenta ya con una casa comunitaria de semillas, invernadero, huerto, vivero y los alumnos aprenden a elaborar compostas, lombricompostas y el método biointensivo. El Municipio, en plena pandemia del 2020, decidió declararse agroecológico y cambiar la forma de hacer las cosas: no se promueven más los productos agroindustriales, se impulsa la transición de la mano de la asociación ganadera y acabamos de vivir el Quinto Festival de las Frutas y Semillas Nativas, un evento lleno de agroecología y esperanza.

Hay un momento mágico. Es cuando el bioinsumo se transforma en fiesta. Cuando eso ocurre, a la transición agroecológica nadie la para. Es más, hasta la crisis climática y los eventos meteorológicos la favorecen.

Para finalizar y recapitular la información de esta sección, se presenta una síntesis de estas cinco experiencias en el uso de bioinsumos (Tabla 1).

Tabla 1. Síntesis de las experiencias en bioinsumos agrícolas de elaboración propia

Experiencia	COA, participantes y años de experiencia con bioinsumos	Bioinsumos utilizados	Impacto en unidades productivas o parcelas
La Casa del Maíz en San Juan Evangelista, Tlajomulco, Jalisco	COA de 8-10 integrantes Se atienden 400-500 visitantes al año en el tema de bioinsumos 15 años de experiencia	Bioinsecticidas de plantas silvestre y cultivadas Caldo bordelés Caldo sulfocálcico Compostas de residuos agrícolas y de baño seco Nijayote Orina humana fermentada Supermagro Tés o biopreparados de frutas maduras, ajo y cola de caballo	Fertilización y manejo de todos los cultivos a base de bioinsumos. Producción de alimentos nutritivos y sanos. Rescate y conservación de distintas variedades de maíz criollo. Regeneración del suelo y su microbiota.



Experiencias campesinas en el sur de Jalisco	COA de 12 integrantes Se acompaña a 200 productores de la región 10 años de experiencia	Agronosodes Biofósforo (8-24) Bioles diversos Caldo sulfocálcico y sulfopotásico Enmelazado (urea y nitrato de potasio) Entomopatógenos (hongos) Hidrolizado de leonardita Jabón potásico Microorganismos de montaña y otros más	Manejo total a base de bioinsumos y libre de agrotóxicos.
Producción de bioinsumos para el cultivo sustentable de caña de azúcar en Francisco I. Madero, Nayarit	COA de 20 integrantes siendo las/los mismos productores participantes 3 años de experiencia	Caldo sulfocálcico Herbicida a base de vinagre Microorganismos de montaña Supermagro básico y mejorado y otros más	Mejor macollamiento y crecimiento de la caña de azúcar. Incremento de la producción y rendimiento. Sustitución parcial de fertilizantes y plaguicidas químicos. Recuperación de la microbiota y salud del suelo.
Producción colectiva de bioinsumos en la Sierra Occidental de Jalisco	COA de 10 integrantes siendo las/los mismos productores participantes 5 años de experiencia	Bioles Caldo sulfocálcico Caldos minerales Compostas Entomopatógenos Harina de huesos Microorganismos de montaña Supermagro	Eliminación del uso de plaguicidas químicos, particularmente en huertas frutales. Reducción de fertilizante químico en un 30%. Recuperación de la fertilidad del suelo.
Grupo de Agricultura Orgánica de La Ciénega, Municipio en transición agroecológica El Limón, Jalisco	COA de 15-20 integrantes Se alcanza a un promedio de 150 personas al año de las regiones Costa Sur y Sierra de Amula de Jalisco 25 años de experiencia	Abonos orgánicos Abonos verdes Agroplus Biorepelentes Bocashi Caldos minerales Entomopatógenos Hidrolizados Lixiviados Microorganismos de montaña Supermagro Tés o biopreparados y otros más	Manejo total a base de bioinsumos y libre de agrotóxicos por más de 20 años. Producción orgánica de varios cultivos. Suelos regenerados.

Fuente: propia

Aprendizajes comunes de las experiencias

Con base en la identificación de aprendizajes comunes se realizó un resumen de los beneficios y desafíos en la elaboración y aplicación de bioinsumos.

¿Por qué producimos nuestros propios bioinsumos?

- Autonomía y autodeterminación del productor/a. Se reduce la dependencia a productos comerciales, al paquete tecnológico agroindustrial, a tecnologías y conocimientos externos que no son localmente apropiados.
- Existe un ahorro económico para el/la agricultor/a. Se reducen los costos de producción, particularmente en los insumos agrícolas.



- No se contamina, intoxica, ni degrada al agroecosistema –ni se daña la salud de las personas– con agroquímicos tóxicos y perjudiciales. Se practica y promueve una agricultura sustentable.
- Se regeneran los agroecosistemas, en especial los suelos. También “se regenera y cura una sociedad intoxicada”. Se regenera la microbiota, la diversidad de microorganismos y la vida del suelo, que es la base de una agricultura saludable.
- Con bioinsumos sanos se producen y consumen alimentos nutritivos y saludables.
- Existe un reciclaje de los residuos-insumos agrícolas: estiércoles, bagazo, podas de árboles, deshechos de cocina, etc. Todo se aprovecha y recircula y no se genera desperdicio (ni contaminación hacia el exterior).
- Los bioinsumos se prestan para hacerlos de manera colectiva. Todas y todos cooperan con lo que tienen disponible, frecuentemente se comparten los gastos. Se contribuye al tejido comunitario, la cohesión social, la colaboración intergeneracional y el empoderamiento de las comunidades.
- Los bioinsumos enseñan. El producirlos y usarlos genera mucha experiencia, cada vez que se hacen se aprende algo nuevo. La experiencia se comparte con más personas interesadas, se aprende al enseñar y se suman más productores/as al movimiento. Existe una concientización.
- Existe un rescate y diálogo de saberes y vivencias. Se transmite nuestra cultura a las nuevas generaciones. Las prácticas tradicionales dialogan con lo técnico-científico, surge la experimentación, la praxis y el conocimiento empírico.

¿Qué dificultades hemos encontrado en el uso, difusión y adopción de bioinsumos?

- La elaboración de bioinsumos toma tiempo y trabajo, requiere organizarse, prepararse y planificarse. No es algo que se consigue (o compra) prontamente. Es común que los bioinsumos no se aplican porque simplemente no se hacen.
- Puede ser difícil producir suficientes bioinsumos, tener bastantes materiales accesibles o aprovechables para su elaboración; a veces se requieren grandes cantidades de bioinsumos. En parcelas extensas, p. ej. de más de 5 ha, tanto la producción como la aplicación de bioinsumos puede llegar a ser un reto.
- Muchos bioinsumos son preventivos, se requieren más aplicaciones y se necesita ser repetitivo y constante, lo que a veces no gusta.
- Muchos/as productores/as esperan que un bioinsumo tenga un efecto inmediato, que los cultivos reaccionen enseguida, lo que es poco probable en suelos degradados por el abuso de agroquímicos durante varias décadas. La regeneración de suelos toma tiempo y paciencia.



- Existe resistencia al cambio e incredulidad, especialmente con los/las productores/as de mayor edad. No hay cambio hasta que no se ven resultados tangibles y claros, y aun así falta un trabajo de convencimiento.
- El mono-enfoque productivista se impone por todos lados. Se prioriza la producción, el rendimiento, todo se valora en toneladas sacadas. Los bioinsumos no cumplen con esta expectativa capitalista, los bioinsumos requieren y precisan otro enfoque mucho más integral.
- Y, finalmente, ¡los bioinsumos huelen! En especial al principio y si no se está acostumbrado/a pueden oler mal y causar repulsión y rechazo.

Conclusiones

Los bioinsumos agrícolas de elaboración propia se posicionan como una práctica agroecológica popular, auténtica y sostenible, adoptada y difundida por las y los mismos productores por diversos motivos y razones, incluyendo la autonomía que les brinda, el ahorro económico y manejo eficiente, el cuidado a la salud de las personas y el ambiente, y la comunalidad que promueve. Los bioinsumos representan y demandan un enfoque de manejo integral y sostenible, cuyos principios están bastante alineados a los balances de una agricultura campesina en plena relación con su ambiente (Van der Ploeg, 2014).

El reto más grave en el uso, difusión y la adopción de bioinsumos, y más cuando se apunta hacia un escalamiento de prácticas agroecológicas, es justamente el propiciar y lograr este cambio de enfoque. La demanda de tiempo, trabajo y organización, así como la paciencia, compromiso y convicción que la acompañan son, sin duda, difíciles, pero no insostenibles. En el caso de las experiencias y procesos de investigación-acción facilitados por los/las especialistas, los valores de cuidado, reciprocidad y comunalidad que se practican hacen que estas ‘dificultades’ cobren sentido. La agroecología, en principio, busca emplear tecnologías amables e ingeniosas, en contraposición de aquellas dominantes y basadas en el uso intensivo de combustibles (Perfecto y Vandermeer, 2024). Las tecnologías que promueve la agroecología, como los bioinsumos, son incompatibles con un mono-enfoque productivista. Con base a estas experiencias de praxis y principios agroecológicos, se reafirma que la coproducción y reproducción de bioinsumos cuida y regenera los ecosistemas y comunidades.

La presente popularidad y auge en la producción y aplicación de bioinsumos en la agricultura mexicana se relaciona en parte a una etapa de escalamiento agroecológico (2018-2023) impulsado por el gobierno de México (Toledo y Argueta, 2024). Las políticas públicas favorables, p.ej. los decretos presidenciales y los apoyos del gobierno federal para una agricultura sin glifosato, los discursos movilizadores,



p.ej. ante la policrisis global, los procesos de enseñanza-aprendizaje constructivista, como el PIES AGILES, y las prácticas agroecológicas simples y efectivas, como los bioinsumos de elaboración propia, son todos impulsores clave para la masificación de la agroecología (Mier y Terán Giménez Cacho *et al.*, 2021). Con más de cinco décadas de experiencia conjunta en el uso de bioinsumos, los/las especialistas han logrado o están encaminados a una eliminación y sustitución completa de fertilizantes sintéticos y plaguicidas químicos, i.e. una agricultura responsable y libre de agrotóxicos, dando un paso más en la transición agroecológica y la transformación de los sistemas agroalimentarios locales y regionales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que el proceso de investigación-acción se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

PIES AGILES fue un proyecto auspiciado por Conahcyt y respaldado por el CIATEJ (F003-Proyecto 321324), con el apoyo interinstitucional operativo de ECOSUR, CIESAS y COLMICH, Centros Públicos de Investigación del Conahcyt.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras comunidades de aprendizaje (COA) con quienes hemos aprendido, enseñado, preparado y aplicado bioinsumos en beneficio de nuestros cultivos y comunidades. Reconocemos también al programa PIES AGILES 2021-2023, incluyendo a nuestras/os compañeras/os de la CASA Jalisco-Nayarit y Colima con quienes compartimos estas experiencias. AH agradece también al Programa 'Investigadoras e Investigadores por México' del Conahcyt, por permitirle acompañar y aprender de estos procesos.

Referencias

- Armenta-Bojórquez, A. D., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J. R., Apodaca-Sánchez, M. A., Gerardo-Montoya, L. y Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 51–56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46112896007>
- Comisión Estatal de Derechos Humanos Jalisco. (2021). *Recomendación 141/2021. Violación de los derechos humanos a la legalidad, en relación con la protección de la salud, al medio ambiente sano y a los derechos de la niñez*. Consultado el 23 de marzo de 2024 de <http://historico.cedhj.org.mx/recomendaciones/emitidas/2021/Reco%20141-2021%20VP.pdf>



- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. (s.f.). *Producción sin glifosato: Un capítulo del Ecosistema Nacional Informático de Soberanía Alimentaria. Gobierno de México*. Consultado el 10 de junio de 2024 de <https://alimentacion.conahcyt.mx/produccionsinglifosato/>
- Coutiño-Puchuli, A. E., Peña-Borrego, M. D. e Infante-Jiménez, Z. T. (2023). Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el período 2015-2020. *Terra Latinoamericana*, 41, e1449. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1449>
- Gliessman, S. R. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*. (3a ed.). CRC Press/Taylor and Francis Group.
- Heinze, A. (2024). Experiencias en investigación-acción y agroecología del nodo Jalisco-Nayarit de PIES AGILES. *Horizontes Transdisciplinarios*, 2(1), 165–180. https://www.revistaht.mx/_files/ugd/7feb39_3ed547b5af3b4920a5470b91688694ff.pdf
- Mamami de Marchese, A. y Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Revista Agronómica del Noreste Argentino*, 38(1), 9–21. <http://www.scielo.org.ar/pdf/ranar/v38n1/v38n1a01.pdf>
- Mier y Terán Giménez Cacho, M., Giraldo, O. F., Aldasoro, M., Morales, H., Ferguson, B. G., Rosset, P., Khadse, A. y Campos, C. (2021). Masificación de la agroecología: impulsores clave y casos emblemáticos. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 58, 480–508. <https://doi.org/10.5380/dma.v58i0.81503>
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado el 23 de marzo de 2024 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Pérez Sánchez, J. M., Velasco Orozco, J. J. y Reyes Montes, L. (2014). Estudios sobre agricultura y conocimiento tradicional en México. *Perspectivas Latinoamericanas*, 11, 144–156. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/32863>
- Perfecto, I. y Vandermeer, J. (2024). Reflections on research agendas in agroecology: In search of a practical guide. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 13(3), 1–7. <https://doi.org/10.5304/jafscd.2024.133.006>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (30 de junio de 2022b). *Bioinsumos transición agroecológica. Gobierno de México*. Consultado el 10 de junio de 2024 de <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/bioinsumos-transicion-agroecologica>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (12 de julio de 2022a). *Bioinsumos, una alternativa más para llegar a la autosuficiencia alimentaria. Gobierno de México*. Consultado el 10 de junio de 2024 de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/bioinsumos-una-alternativa-mas-para-llegar-a-la-autosuficiencia-alimentaria>
- Secretaría de Gobernación. (31 de diciembre de 2020). *Decreto para sustituir gradualmente el uso, adquisición, distribución, promoción e importación de la sustancia química denominada glifosato y de los agroquímicos que lo contienen*. Diario Oficial de la Federación, Estados Unidos Mexicanos. Recuperado el 15 de abril de 2024 (en versión



HTML) de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609365&-fecha=31/12/2020

Toledo, V. M. y Argueta, Q. (2024). The evolution of agroecology in Mexico, 1920–2023. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 12(1), 00092. <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00092>

Van der Ploeg, D. (2014). *Peasants and the Art of Farming*. Practical Action Publishing. <http://dx.doi.org/10.3362/9781780448763>





CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEJ