



REVISTA DIGITAL TEC TUXTLA

AGOSTO - DICIEMBRE 2025

ISSN 2992 - 7889

No 6
2025

- Estudio del cultivo de la microalga *Chlorococcum* sp. En fotobiorreactor de tanque con agitación magnética.
- El efecto de estratificación de parámetros fisicoquímicos en el lago eutrofizado La encantada en el Parque Nacional Lagunas de Montebello.
- Innovación sostenible: síntesis de acetato y sulfato de celulosa a partir de semillas de mango (*Mangifera indica*) para su uso como polímeros alternativos.
- Control de la calidad como herramienta para evaluar biofertilizantes rizobianos en la agricultura sustentable del chile en chiapas, México.
- Tecnologías físicas aplicadas a semillas de cacahuete.
- Caracterización de las comunidades fúngicas en un sistema de vermicomposteo enmendadas con residuos de conejo.
- Identificación molecular y caracterización bioquímica del potencial de biocontrol de la cepa nativa extremófila *Brevibacillus* sp. VCA3.



tuxtla.tecnm.mx

EDICIÓN ESPECIAL

"Ciencia y Tecnología con Sentido Humano"



CINTILLO LEGAL

TEC TUXTLA, número 6 - 2025, agosto – diciembre 2025, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, a través del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana km. 1080, C.P. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Contacto: 01 961 615 0461, cyd_tgutierrez@tecnm.mx, www.tuxtla.tecnm.mx. Editor Responsable: Francisco Rangel Genovés Genovés. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2023-041116373200-102, ISSN: 2992-7889, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Departamento de Comunicación y Difusión, Ana Erika Pérez Galindo, Carretera Panamericana km. 1080 C.P 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Fecha de la última modificación: 01 de abril de 2025.

Queda prohibida la reproducción total o parcial en cualquier medio, del contenido de la presente revista electrónica, sin contar con la autorización del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



Director del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
José Manuel Rosado Pérez

CONSEJO EDITORIAL

Presidente del Consejo Editorial
Juana Cruz Cancino
Subdirección de Planeación y Vinculación

Secretaria Técnica del Consejo Editorial
Ana Erika Pérez Galindo
Departamento de Comunicación y Difusión

MIEMBROS

Francisco Alexandre Rincon Molina
División de Estudios Profesionales

Amín Rodríguez Meneses
*Departamento de División de Estudios
de Posgrado e Investigación*

José Rigoberto Ruiz Gamboa
Departamento de Recursos Materiales

Lissette Escobar Ramírez
Centro de Información

Francisco Rangel Genovés Genovés
*Editor Responsable
Maquetación*

Ethel Rosalí Vázquez del Porte
Oficina de Difusión Audiovisual

COMITÉ EDITORIAL

Miguel Abud Archila

Rocío Meza Gordillo

Victor Manuel Ruiz Valdiviezo

Madaín Pérez Patricio

Carlos Ríos Rojas

Héctor Ricardo Hernández de León

Carlos Arias Castro

Pedro Tomas Ortiz y Ojeda

Idelberto de los Santos Ruiz

Edna Morales Coutiño

Miguel Cid del Prado Martínez



Tabla de contenido

ESTUDIO DEL CULTIVO DE LA MICROALGA <i>CHLOROCOCCUM</i> SP. EN FOTOBIOREACTOR DE TANQUE CON AGITACIÓN MAGNÉTICA.....	5
EL EFECTO DE ESTRATIFICACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN EL LAGO EUTROFIZADO LA ENCANTADA EN EL PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE MONTEBELLO	16
INNOVACIÓN SOSTENIBLE: SÍNTESIS DE ACETATO Y SULFATO DE CELULOSA A PARTIR DE SEMILLAS DE MANGO (<i>MANGIFERA INDICA</i>) PARA SU USO COMO POLÍMEROS ALTERNATIVOS	22
CONTROL DE LA CALIDAD COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR BIOFERTILIZANTES RIZOBIANOS EN LA AGRICULTURA SUSTENTABLE DEL CHILE EN CHIAPAS, MÉXICO	43
TECNOLOGÍAS FÍSICAS APLICADAS A SEMILLAS DE CACAHUATE.....	48
CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES FÚNGICAS EN UN SISTEMA DE VERMICOMPOSTEO ENMENDADAS CON RESIDUOS DE CONEJO	60
IDENTIFICACIÓN MOLECULAR Y CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA DEL POTENCIAL DE BIOCONTROL DE LA CEPA NATIVA EXTREMÓFILA <i>BREVIBACILLUS</i> SP. VCA3	71



Estudio del cultivo de la microalga *Chlorococcum* sp. en fotobiorreactor de tanque con agitación magnética

Castillo-Espinosa, Ahemed¹, Rosales-Quintero, Arnulfo^{1,*} (0000-0001-5609-7532), Castañón González, Humberto¹ (0000-0003-3625-6414), Villalobos-Maldonado, Juan José¹ (0000-0002-1576-1932), López Quiroz, Delmar Ernesto¹ (0009-0009-5009-0714)

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana Km. 1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, C.P. 29050.; (A.C.E.,A.R.Q.,H.C.G.,V.M.J.J.,D.E.L.Q.).

*Autor por correspondencia: arquinte@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

En este presente proyecto se realizó las cinéticas de crecimiento del cultivo de la microalga *Chlorococcum* sp., cultivadas en un fotobiorreactor (FBR) de tanque con agitación magnética, en medio BBM y fertilizante triple 18. Se evaluó la producción de biomasa, clorofila y lípidos totales a lo largo de una cinética de 13 días. Por otro lado, Se estudió el comportamiento hidrodinámico mediante dinámica computacional de fluidos (CFD), representando las velocidades de flujo y patrones de flujo dentro del FBR.

Los resultados de las cinéticas en el FBR de tanque agitado muestran una biomasa máxima de 0.8×10^7 cel/mL, clorofila *a* y *b* de 2.64 y 1.53 $\mu\text{g/mL}$, un contenido de carotenoides de 1.203 $\mu\text{g/mL}$, y 67.7 mg de lípidos. Del modelado en CFD, se realizó la comparación de forma experimental de los flujos que corresponden a lo representando en las simulaciones.

Palabras clave: Fotobiorreactor, biomasa, dinámica computacional de fluidos.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son un grupo de organismos fotosintéticos con una estructura simple lo que permite un crecimiento celular y producción de biomasa en periodos cortos de tiempo. Por esta razón, las microalgas son denominadas microorganismos fotoautótrofos, siendo la luz su principal fuente de energía y el dióxido de carbono (CO_2) su principal fuente de carbono (Fung Pak, 2011). Las microalgas son una prometedora materia prima para la producción de biodiesel, debido a su capacidad de crecer en ambientes adversos. Algunos de estos microorganismos son capaces de acumular entre 50 y 70 % de base seca de lípidos (Chisti, 2007). Además, estos microorganismos son capaces de producir antibióticos, pigmentos, esteroides y otros compuestos haciendo solo uso de la luz solar, el dióxido de carbono y el agua dulce, salada o medio sintético (Grobelaar, 2000).

El cultivo de las microalgas se realiza en matraz o en fotobiorreactores, abiertos o cerrados. En particular, los sistemas cerrados son contruidos de materiales transparentes (vidrio u otros) que permiten la absorción de la luz en el cultivo, así también, proporcionando otros requerimientos como el mezclado, la transferencia de masa, momento y calor. En los fotobiorreactores hay dos tipos, los de agitación mecánica que son los reactores de tanque agitado, que son sistemas cilíndricos con un sistema de agitación mecánico y los reactores de agitación neumática, son los que se agitan por medio de la aireación o inyección de aire, como los *airlift*, placa plana o panel y de columna de burbujeo.



Los fotobiorreactores de tanque agitado tienen las ventajas de ser de fácil construcción y operación y tienen las desventajas de tener zonas de estancamiento y la posibilidad de ruptura celular. Así mismo el FBR debe garantizar que la iluminación sea uniforme y que el mezclado garantice un que los nutrientes sean distribuidos uniformemente, que durante el mezclado las microalgas tengan acceso a los fotones, que el transporte del oxígeno producido hacia el aire sea efectivo, que no se tenga ruptura celular, que no exista sedimentación de la biomasa y un alto rendimiento de biomasa y metabolitos (Deniz, 2020).

En el estudio de los fenómenos que se presentan en los fotobiorreactores en los cultivos de microalgas, en la actualidad se aplican herramientas computacionales para el modelo y comprensión de la dinámica de fluidos, al permitir predecir los parámetros que caracterizan el fenómeno físico a estudiar, a través de la simulación de los modelos matemáticos, análisis numéricos y correlaciones requeridas. Programas como Fluent, CFX, CVD, COMSOL Multiphysic, entre otros; permiten realizar dichas simulaciones para sistemas multifásicos. Estos softwares se basan en la generación de códigos de Dinámica computacional de fluidos o CFD (por sus siglas en inglés) (Calvo, 2015). La dinámica computacional de fluidos es la ciencia de predicción de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, las reacciones químicas, y los fenómenos relacionados, mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos utilizan métodos numéricos (Bakker, 2008). El desarrollo de la dinámica computacional de fluidos (CFD) proporciona información cualitativa y cuantitativa sobre la hidrodinámica y el rendimiento de la mezcla en varios tipos de sistemas del mezclado (Konopacki et al., 2015).

En el laboratorio 7 del ITTG se han aislado diversas microalgas de recursos hídricos estatales como son: lagunas de Montebello, cascadas del chiflón y de una laguna de lixiviados donde se aisló la microalga *Chlorococcum*, de las cual existen pocos estudios de su cultivo en FBR. Además, en el laboratorio 7 tienen diversos prototipos de FBR de panel, de tanque agitado y de columna de burbujeo.

Debido a estas capacidades en esta investigación se realizó el cultivo de las microalgas *Chlorococcum* sp., en fotobiorreactores de tanque en agitación mecánica y reactor de panel con aireación, para la evaluación de sus parámetros cinéticos para determinar sus eficacias como sistemas de cultivos. También se usó el software COMSOL Multiphysic para obtener la simulación 3D de los fotobiorreactores para calcular las hidrodinámicas y parámetros reológicos con la que trabajan los dos sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microalga

Se utilizó la microalga *Chlorococcum* sp. (Meneghini 1842) pertenece a la familia *Chlorococcaceae*, orden *Chlamydomonadales*, clase *Chlorophyceae*, phylum *Chlorophyta* (Guiry & Guiry, 2014). Fue aislada e identificada por Escobar-Pacheco (2023) de una laguna de lixiviados de un relleno sanitario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez bajo las siguientes condiciones 29.12°C y pH 7.6. La microalga *Chlorococcum* también se caracteriza por ser frecuentemente aislada de la superficie del suelo y presentar gran resistencia a sequías, estrés salino y amplio rango de pH, entre 2 y 10 (Klochkova et al., 2006; Lee, 2008). Liu & Lee (2000) reportaron la capacidad que tiene *Chlorococcum* sp. de acumular carotenoides bajo condiciones estresantes de nutrientes, pH, salinidad e iluminación.

FBR de tanque agitado

En el fotobiorreactor de agitación magnética se usó 2.5 L de medio de cultivo sintético a un pH de 7.6, una temperatura de 25°C, un fotoperiodo de luz/oscuridad 12:12 iluminados con lámparas led con una irradiancia de 46 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, y una agitación de 600 rpm (Figura 1).



Figura 1. Fotobiorreactor de agitación magnética.

Se utilizó el medio BBM y el fertilizante triple 18, donde se cuantifico la formación de biomasa de manera diaria por un periodo de 13 días por la técnica de conteo directo empleando una cámara de Neubauer marca Hauser modelo BL0010 extrayendo 200 mL de muestra y analizando en el microscopio con objetivo de 40X, para el conteo celular, la concentración celular se determinó con la formula (Arredondo Vega & Voltolina, 2007):

$$C = N * 10^4 \text{dil} \quad (1)$$

Cuantificación de pigmentos

La cuantificación se realizó por metodo espectrofotometrico. Se centrifugaron 5 ml de cultivo a 4000 rpm en 15 min, a la pasta celular obtenida se le adiciono 5 mL de metanol y se calentó a 60 °C por 10 min en baño maría Las muestras se refrigeraron por 24 horas en completa oscuridad y se prosiguió a centrifugar por 10 min a 3500 rpm. Los sobrenadantes obtenidos se aforaron al volumen original de 5 mL y se midió su absorbancia a 470, 653 y 666 nm de longitud de onda. La cantidad de clorofila se calculó mediante las siguientes formulas (Lichtenthaler Hartmut K. & Wellburn, 1983):

$$C_a = 15.65 * A_{666} - 7.34 * A_{653} \quad (2)$$

$$C_b = 27.05 * A_{653} - 11.21 * A_{666} \quad (3)$$

$$C_{x+c} = \frac{1000 * A_{470} - 2.86 * C_a - 129.2 * C_b}{221} \quad (4)$$



Dinámica computacional de fluidos

Para el proceso de modelado computacional se siguieron los siguientes pasos:

1. Selección del tipo de estudio.
2. Construcción del modelo físico del sistema.
3. Generación del mallado.
4. Resolución: Las ecuaciones se resuelven de forma iterativa.
5. Post-procesamiento

Para la selección del tipo de estudio se seleccionó estacionario e hidrodinámica, el tipo de estudio fue flujo turbulento con el método k- ϵ .

Las simulaciones hidrodinámicas en 3D se realizaron con en el software COMSOL Multiphysic versión 6.0. Donde se consideraron las dimensiones del FBR de acuerdo a los datos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geométricos y reológicos del reactor de tanque agitado empleadas en la simulación.

Variable	Valor	Descripción
Ht	0.3 m	Altura del tanque
Rt	0.0975 m	Radio del tanque
Re_t	0.015 m	Redondeo del tanque
Ra	0.0045 m	Radio del agitador
La	0.07 m	longitud del agitador
Rdg	0.05 m	Radio del dominio giratorio
Hdg	0.02 m	Altura del dominio giratorio
f	8.33 s ⁻¹	Frecuencia

Las simulaciones se realizaron con agua líquida ($\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) como fase continua. El modelo se desarrolló bajo las suposiciones de:

1. Fluido newtoniano: El fluido agua se modeló como newtoniano, con esfuerzo cortante proporcional a la tasa de deformación.
2. Agitación idealizada: Velocidad angular uniforme, despreciando irregularidades en el acoplamiento magnético.
3. Propiedades isotrópicas: Viscosidad, densidad y tensión superficial se tomaron como uniformes, despreciando variaciones por temperatura o concentración.
4. Gravedad constante: Se consideró el campo gravitatorio uniforme, con valor de 9.81 m/s^2 en dirección vertical.



Modelos físicos y ecuaciones gobernantes

El balance de momentum es regido por las ecuaciones de Navie-Stokes, y la conservación de la masa es regida por la ecuación de continuidad. Los efectos de turbulencia son modelados usando el modelo de dos ecuaciones κ - ϵ con restricciones de realizabilidad (COMSOL, 2022).

En flujos monofásicos se basa en las ecuaciones de Navie-Stokes, su forma general se escriba de la siguiente manera (Márquez Baños, 2021):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-\rho \mathbf{I} + (\mu + \mu_T) \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T + \mathbf{F}) \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{u}$ es el vector de velocidad, $\mathbf{F}$ es el vector de fuerzas de volumen, $\mathbf{I}$ es la matriz identidad, μ es la viscosidad del fluido, y μ_T es la viscosidad turbulenta. El superíndice T indica que es la transpuesta del vector y el “ $\cdot$ ” indica un producto punto vectorial.

El modelo κ - ϵ estándar introduce dos ecuaciones de transporte adicionales y dos variables dependientes: la energía cinética turbulenta, κ , y la tasa de disipación de la energía de turbulencia ϵ .

La viscosidad turbulenta es calculada por (Zhang et al., 2006).

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{\kappa}{\epsilon} \quad (7)$$

Donde C_μ es una constante del modelo.

La ecuación de transporte para κ es:

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \kappa = \nabla \cdot (D_E \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\kappa} \nabla \kappa) + P_\kappa - \rho \epsilon \quad (8)$$

La ecuación de transporte de la variable ϵ es:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot (D_E \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{P}{\kappa} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (9)$$

Las constantes C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_κ , σ_ϵ , de las ecuaciones anteriores se determinan a partir de datos experimentales, teniendo los siguientes valores: 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3, respectivamente (Wilcox, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de crecimiento

Se evaluó el crecimiento de *Chlorococcum* sp en un periodo de 13 días, la biomasa máxima fue de 7.44×10^6 cel/mL. En la figura 2 se observa que del día 4 al 5 tuvo un incremento exponencial, pero entre el día 6 y 12 descendió la producción de biomasa manteniéndose el crecimiento en fase estacionaria en esos días, hasta incrementarse en el día 13.

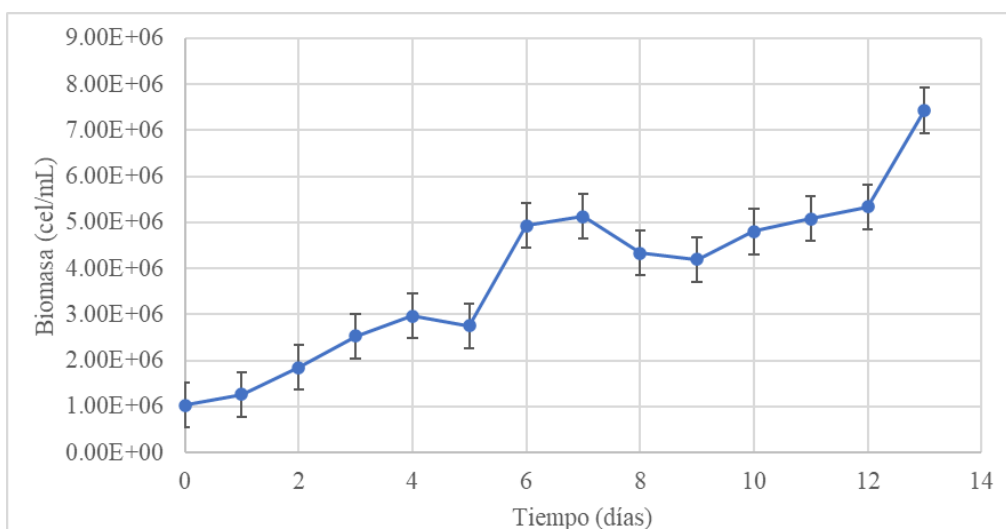


Figura 2. Cinética de crecimiento de *Chlorococcum* sp en medio BBM con fertilizante triple 18-18-18.

Las constantes de velocidad especifican de crecimiento, tiempo de duplicación y producción de lípidos fueron:

$$\mu = 0.1278 \text{ días}^{-1}$$

$$td = 5.42369 \text{ días}$$

$$\text{Lípidos} = 67.7 \text{ mg/L}$$

Pigmentos fotosintéticos

La producción máxima de clorofila a, b y carotenoides fue $2.6487 \mu\text{g/mL}$, $1.5345 \mu\text{g/mL}$ y $1.203 \mu\text{g/mL}$ respectivamente. En la figura 3 se observa que la producción de clorofila a tuvo un decrecimiento notable entre el día 5 y el día 9, hasta después de ese día tener otro decrecimiento menor y paulatinamente descender su producción. Con la clorofila b también tuvo decrecimientos notables en el día 2, 6 y 13 en su producción, la producción de carotenoides fue la producción que se mantuvo más constante.

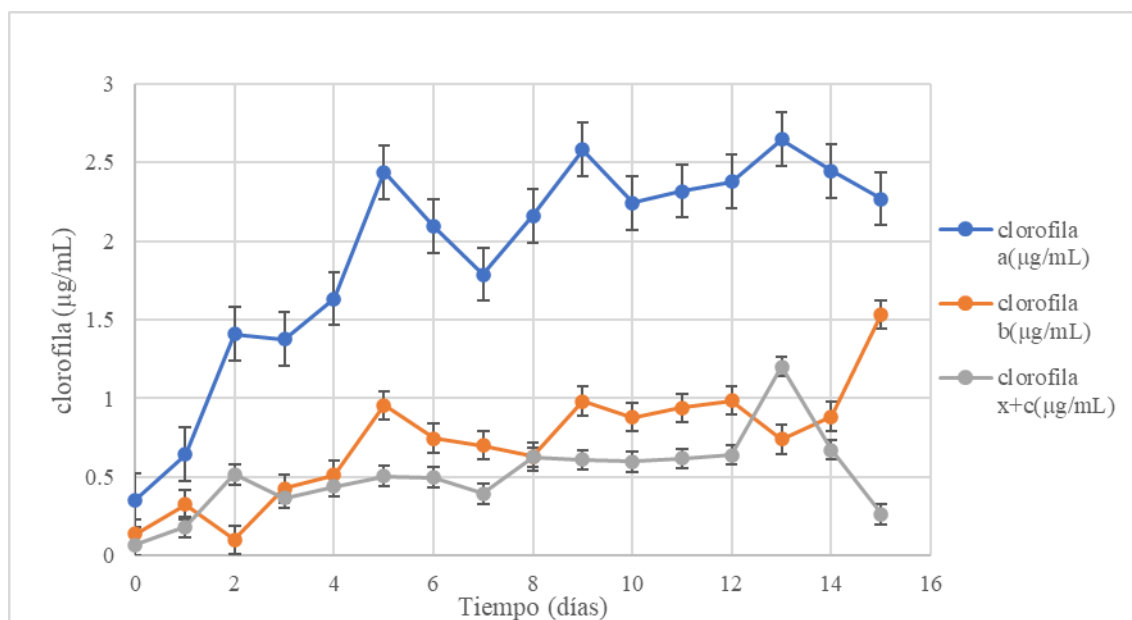


Figura 3. Cinética de producción de pigmentos fotosintéticos de *Chlorococcum* sp en medio BBM con fertilizante triple 18-18-18.

Hidrodinámica del fotobiorreactor de tanque

Los patrones de flujo de velocidad se presentan en la figura 4, donde se dividió el gráfico en cuatro cortes para visibilizar el incremento y descenso de la velocidad en la parte inferior, intermedia y en la parte superior del tanque. Al ser un agitador magnético colocado de forma horizontal en el fondo del tanque, se produce un flujo rotacional, los vectores siguen un a solo dirección en todo el tanque de forma organizada.

La velocidad máxima que alcanzan los vectores es de 0.31 m/s, la velocidad en el centro es casi nula sin tener agrupación de vectores en dicha posición, teniendo una velocidad entre un rango de 0.25-0.2 m/s. esto es debido a la formación del vórtice en el centro como consecuencia del flujo rotacional del agitador. En el corte superior la velocidad alcanza su punto más bajo de 0.03 m/s en el centro mientras que alrededor se observa una magnitud de 0.29 m/s.

Para visualizar la dirección del flujo en el tanque se uso un aperlante en polvo que al mezclarlo con el agua forma una mezcla homogénea en la que se distinguen las corrientes del flujo del vórtice como se observa en la figura

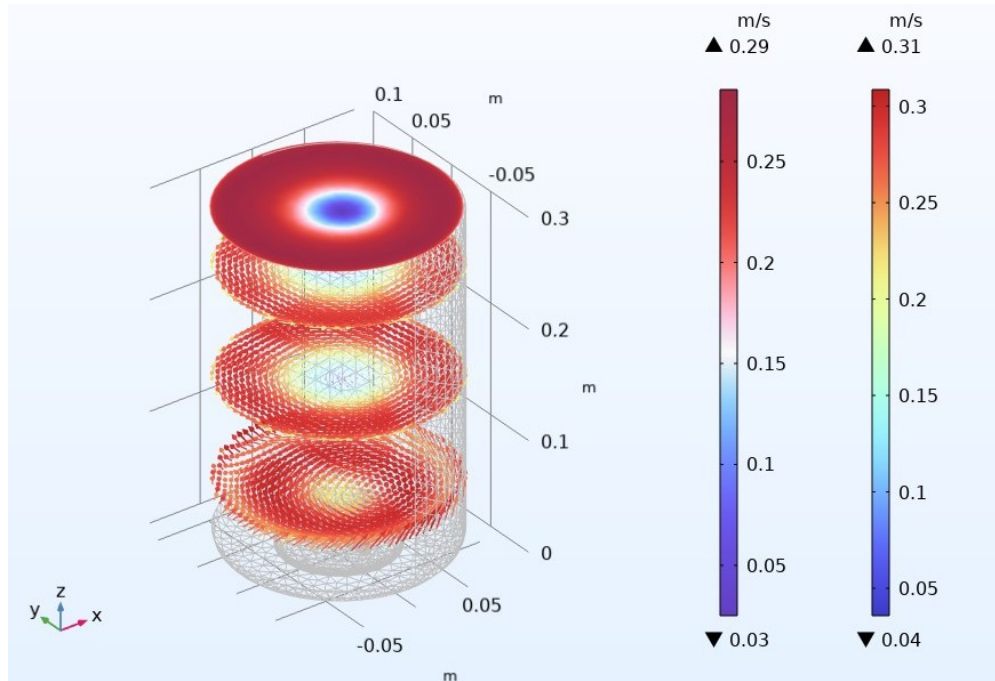


Figura 4. Perfiles de magnitud de velocidad en 5 cortes en plano-xy.

En la figura 5, se presenta el grafico de la simulación del vórtice en el tanque dibujado con líneas de corriente. Se observa que la parte superior se forma un remolino indicando que es la zona donde hay mayor turbulencia. A medida que desciende el remolino se va disipando hasta formar el vórtice en todo el centro del tanque. También se observan unas pequeñas líneas de corriente dispersas en las paredes. En la validación experimental, primero se observó la formación del vórtice en el tanque a una velocidad 600 rpm como se muestra en la figura 5. En comparación con la simulación de las líneas de corriente el vórtice es más ancho y desproporcionado en su dimension.

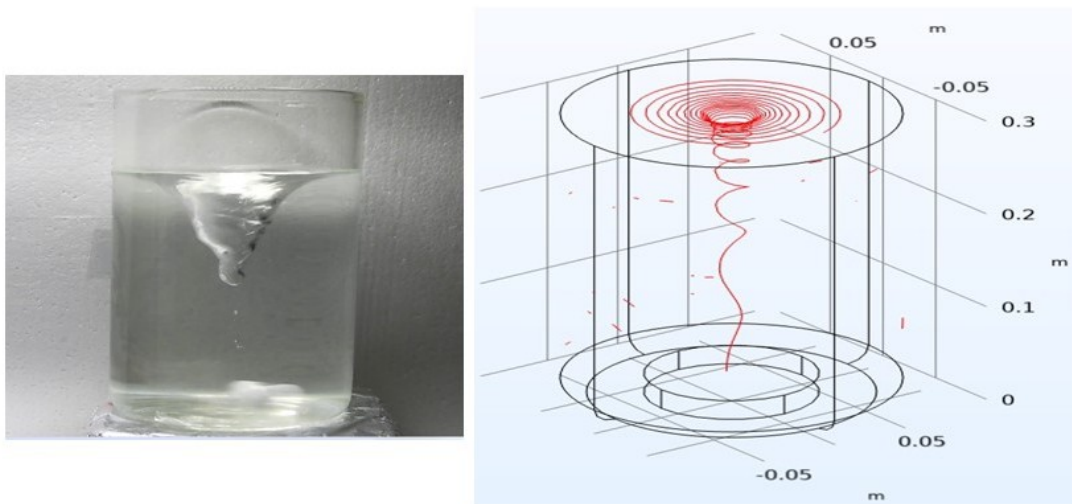


Figura 5. Líneas de corriente del campo de velocidad.

Para visualizar la dirección del flujo en el tanque se usó un aperlante en polvo que al mezclarlo con el agua forma una mezcla homogénea en la que se distinguen las corrientes del flujo del vórtice como se observa en la figura 6. La cual permite observar de manera experimental las líneas de corriente generadas dentro del FBR, al cual al ser comparado con la simulación se verificó que las corrientes se originan desde el impulsor con dirección rotacional hacia la izquierda, al igual se observa una acumulación de corrientes en la altura media del FBR, como fue descrito en las simulaciones.

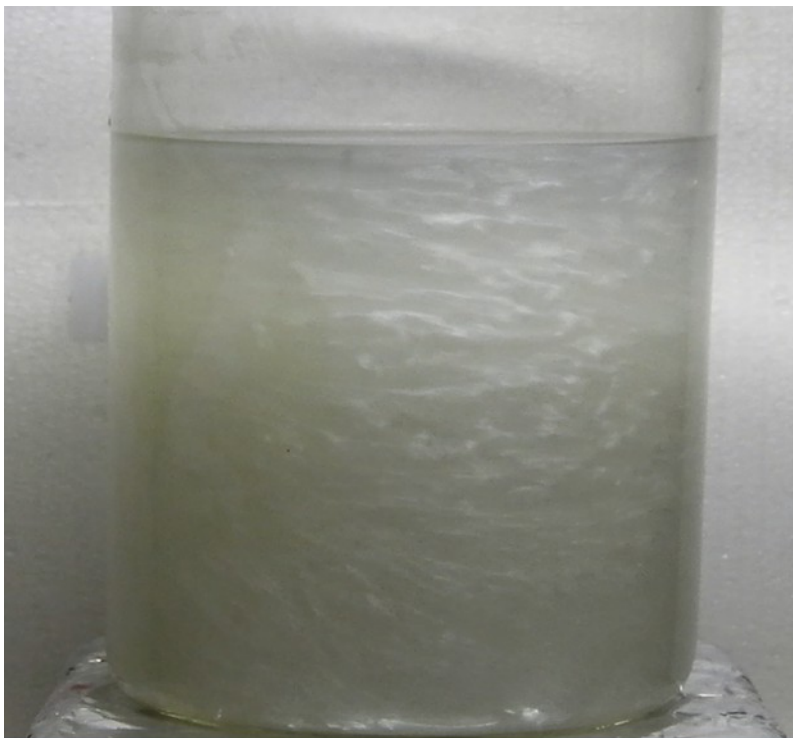


Figura 6. Líneas de corriente del campo de velocidad.

CONCLUSIONES

Se realizó las cinéticas de crecimiento del cultivo de *Chlorococcum* sp., cultivado en FBR de tanque con agitación magnética a 600 rpm. Los resultados en el FBR muestran la capacidad de la microalga a adaptarse a la presencia de diferentes compuestos como en este planteamiento a fertilizantes como triple 18, donde podría estar realizándose la degradación de los compuestos que contiene (NKP), por lo que existen procesos adaptativos donde la microalga puede crecer y realizar procesos metabólicos en presencia de estos compuestos para este estudio los resultados muestran una biomasa máxima de 0.8×10^7 cel/mL, clorofila a y b de 2.64 y 1.53 $\mu\text{g/mL}$, un contenido de carotenoides de 1.203 $\mu\text{g/mL}$, y 67.7 mg de lípidos totales, por lo cual es viable en un futuro emplear el uso de microalgas para el proceso de tratamiento de aguas con cargas orgánicas muy altas, como en el caso de aguas empleadas en sistemas de riego y con esto mitigar el proceso de eutrofización de cuerpo de agua.



Por parte de la simulación los resultados obtenidos permiten concluir que el análisis hidrodinámico del fotobiorreactor (FBR) de tanque agitado, realizado mediante simulación numérica en COMSOL Multiphysics 6.0, reproduce adecuadamente el comportamiento experimental del sistema. La aplicación de las físicas correspondientes *Two-Phase Flow*, *Rotating Machinery* y *Level Set*, así como el ajuste de condiciones iniciales y parámetros operativos, permitió generar campos de velocidad confiables, incluyendo perfiles tridimensionales, magnitud de la velocidad y líneas de corriente. En el modelo simulado se identificaron patrones de flujo consistentes con la agitación inducida por la barra magnética, destacando zonas de mayor cizalla, recirculación superior e intensidad de mezcla en torno a la región de la interfase aire-líquido.

De manera complementaria, la validación experimental mediante trazadores (aperlante) permitió visualizar las trayectorias reales del flujo dentro del FBR, evidenciando una distribución del movimiento del fluido análoga a la prevista por las simulaciones. La similitud observada entre ambos enfoques confirma que el modelo numérico es adecuado para describir la dinámica interna del reactor bajo las condiciones operativas evaluadas, y establece una base sólida para estudios posteriores enfocados en transferencia de masa, dispersión de contaminantes y optimización geométrica del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del TecNM a través del proyecto: Efecto del estrés generado por diésel en el perfil lipídico y la plasticidad en el cultivo de la microalga *Pectinodesmus pectinatus* en fotobiorreactor, con clave 22263.25-P.

REFERENCIAS

- Arredondo Vega, B. O., & Voltolina, D. (2007). Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal . *CIB*.
- Calvo, S. F. J. (2015). *Modelación y simulación en CFD del flujo multifase (líquido-sólido-gas) en un fotobiorreactor tipo airlift para el cultivo de microalgas*. Universidad del norte.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- COMSOL. (2022). *COMSOL Multiphysics (Nº de versión 6.0). Windows (6.0)*. COMSOL.
- Deniz, I. (2020). Scaling-up of Haematococcus pluvialis production in stirred tank photobioreactor. *Bioresource Technology*, 310, 123434. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123434>.
- Escobar-Pacheco(2023). Estudio de la tolerancia de una microalga aislada de una laguna de lixiviados de un relleno sanitario a diversos metales. Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez.
- Fung Pak, H. M. (2011). *Optimization Of Photobioreactor For Astaxanthin Production In Chlorella Zofingiensis*. National University of Singapore.
- Grobbelaar, J. U. (2000). Physiological and technological considerations for optimising mass algal cultures. *Journal of Applied Phycology*, 12(3–5), 201–206.
<https://doi.org/10.1023/A:1008155125844>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2014, May). *NCBI*. Chlorococcum Chlorococcoides.



- Klochkova, T. A., Kang, S.-H., Cho, G. Y., Pueschel, C. M., West, J. A., & Kim, G. H. (2006). Biology of a terrestrial green alga, *Chlorococcum* sp. (Chlorococcales, Chlorophyta), collected from the Miruksazi stupa in Korea. *Phycologia*, 45(3), 349–358. <https://doi.org/10.2216/04-58.1>
- Konopacki, M., Kordas, M., Fijałkowski, K., & Rakoczy, R. (2015). Computational Fluid Dynamics and Experimental Studies of a New Mixing Element in a Static Mixer as a Heat Exchanger. *Chemical and Process Engineering*, 36(1), 59–72. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0005>
- Lee, R. Edward. (2008). *Phycology*. Cambridge University Press.
- Lichtenthaler Hartmut K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Liu, B.-H., & Lee, Y.-K. (2000). Secondary carotenoids formation by the green alga *Chlorococcum* sp. *Journal of Applied Phycology*, 12(3–5), 301–307. <https://doi.org/10.1023/A:1008185212724>
- Márquez Baños, V. (2021). *Simulación hidrodinámica de biorreactores*. Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez.
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence Modeling for CFD* (DCW Industries, Ed.).
- Zhang, D., Deen, N. G., & Kuipers, J. A. M. (2006). Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: A study of closures for turbulence and interface forces. *Chemical Engineering Science*, 61(23), 7593–7608. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.053>



El efecto de estratificación de parámetros fisicoquímicos en el lago eutrofizado La Encantada en el Parque Nacional Lagunas de Montebello

Alegría-Gómez, Josué ¹ (0002-9329-4532), Rincón Rosales, Reiner ¹ (0001-8141-2610), Rosales-Quintero, Arnulfo ¹ (0001-5609-7532) y Ruíz-Valdiviezo, Víctor Manuel ^{1*} (0003-0572-8845)

¹ Instituto Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 29050, México.

* Autor por correspondencia: bioqvic@hotmail.com

RESUMEN

Los lagos son ecosistemas de gran relevancia ecológica y social, sin embargo, ante la presión antropogénica y los cambios ambientales han generado procesos de degradación que afectan su calidad y funcionamiento. Con el objetivo de comprender la influencia de parámetros fisicoquímicos en la dinámica de nutrientes, se evaluó la columna de agua del lago La Encantada en el Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, mediante la determinación de temperatura, pH, potencial redox y concentración de fosfatos en columna de agua a diferentes profundidades. Se empleó un diseño experimental completamente al azar y los fosfatos se cuantificaron por espectrofotometría. Los resultados mostraron un gradiente vertical caracterizado por mayores valores de temperatura y pH en superficie, que disminuyeron con la profundidad, mientras que el fosfato presentó el patrón opuesto con concentraciones superficiales bajas (0.018–0.019 mg/L) y valores máximos en el hipolimnion (0.127 mg/L). El potencial redox se mantuvo en valores negativos en toda la columna, evidenciando condiciones reductoras. Los resultados confirman la existencia de un proceso de carga interna de fosfatos, en el que la liberación de estos compuestos se da desde los sedimentos bajo condiciones anóxicas y reductoras, lo cual constituye una fuente significativa de nutrientes para la columna de agua. En conclusión, la estratificación térmica y química del lago La Encantada regula la dinámica del fósforo, lo que representa un factor crítico para su productividad y balance ecológico como los cambios en la coloración, además de aportar información valiosa para la gestión y conservación de ecosistemas lacustres kársticos.

Palabras clave: columna de agua, fosfatos disueltos, pH, temperatura.

INTRODUCCION

Los sistemas lacustres son ecosistemas esenciales como fuentes de agua dulce para consumo humano, la ganadería o la agricultura. Además de regular el clima local y global, estos ecosistemas pueden albergar una rica biodiversidad y oportunidades económicas a través del turismo y actividades como la pesca. Sin embargo, la demanda creciente de los recursos naturales ha llevado a la degradación de los lagos, sin poder restaurar exitosamente los daños ocasionados en los lagos (Poikane et al., 2024).

Es importante comprender que los lagos están estrechamente entrelazados con la producción y los medios de vida humanos, sin embargo, enfrentan vulnerabilidades en el suministro de recursos hídricos. Debido a



las propiedades de expansión y contracción térmica del agua, los cambios en las condiciones ambientales externas generan variaciones en el almacenamiento de temperatura en los lagos. Esto provoca diferencias de densidad y la formación de una estructura térmica estratificada, con capas superficiales más cálidas y capas profundas más frías (Imdad et al., 2025).

Los procesos de estratificación y mezcla en los lagos desempeñan un papel clave en el transporte de gases y energía a lo largo de la columna de agua, también pueden influir en las interacciones agua-atmósfera (Wang et al., 2023). La estratificación térmica estacional divide a los lagos en tres zonas principales: epilimnion, metalimnion e hipolimnion (Boegman, 2022).

La concentración de oxígeno disuelto resulta esencial para mantener la calidad del agua del lago y el equilibrio del ecosistema, las reacciones redox y el reciclaje de la materia orgánica (Ladwig et al., 2021). El epilimnion, conocido como la capa de mezcla caracterizada por una distribución homogénea de temperatura y sustancias volátiles como gases, recircula ocasionalmente debido a fenómenos de viento o períodos de temperaturas más bajas durante el período de estratificación, en esta capa superficial puede actuar como una fuente neta de oxígeno (Boehrer & Schultze, 2008). El metalimnion, conocido también como zona termoclina, donde la temperatura disminuye rápidamente con la profundidad, podría retardar la transferencia de gas, energía y materia entre las zonas del epilimnion superior y el hipolimnion inferior. Por otra parte, el hipolimnion es la capa inferior (zonas más profundas) de los lagos, en la cual el oxígeno disuelto se agota por la mineralización de materia orgánica en la columna de agua y la demanda de oxígeno de los sedimentos, el agotamiento de oxígeno en el hipolimnion resulta en hipoxia y anoxia. En muchos lagos eutrofizados, el agotamiento del oxígeno en la capa inferior (hipolimnion) ocurre anualmente durante la estratificación de verano (Ladwig et al., 2021). En esta zona pueden ocurrir procesos bioquímicos con potencial biotecnológicos, como la metanogénesis, oxidación anaeróbica de metano, fijación de nitrógeno, desnitrificación, anamox, remoción o eliminación de contaminantes entre otros. Se ha evidenciado que los parámetros fisicoquímicos pueden influenciar en las comunidades microbianas, ciclo de nutrientes y potencial funcional. Estudiar estos sitios resulta de interés en vista de

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de muestreo

El área de estudio es la laguna “La Encantada” en el Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM), la cual se ubica en el municipio Trinitaria en el estado de Chiapas bajo las coordenadas 16°07'13" N y 91°43'42" W. Los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) son un complejo de origen kárstico. La principal fuente de alimento de las lagunas es subterránea. Con una superficie total de 545 km², el PNLM está comprendido por la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma una porción de la cuenca del Río Grande de Comitán, la cual también forma una porción de la cuenca del Río Lacantún (CONANP-SEMARNAT, 2007).

Caracterización fisicoquímica de las muestras

La temperatura, conductividad eléctrica fueron determinados in situ con un equipo portátil AZ® 86031 y el pH con un equipo portátil Marca HANNA® modelo HI98129 (Merck®, Kenilworth, NJ, U.S.A.). Con algunas modificaciones, los fosfatos disueltos se determinaron mediante espectrofotometría, según lo descrito por Murphy y Riley (1962). Brevemente, se prepararon soluciones de ácido sulfúrico 5N; se midieron 35,29 mL de H₂SO₄ y se diluyeron en 250 mL de agua destilada y molibdato de amonio; se disolvieron 4 g de molibdato de amonio y se diluyeron en 100 mL. Tartrato de antimonio y potasio: se



disolvieron 0,1372 g de este tartrato y se añadieron a 50 mL de agua destilada. Ácido ascórbico 0,1 M: se disolvieron 0,528 g de ácido ascórbico en 30 mL de agua (esta solución se preparó el mismo día de la determinación porque se oxida fácilmente). La solución estándar de fosfato de 40 mg/L se realizó con 0,1757 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4) en un litro de agua destilada. La preparación de los reactivos se realizó el mismo día en que se realizó la determinación (no se recomienda mantener la mezcla de la solución por más de 24 horas), consecuentemente se midió 48 mL de H_2SO_4 5N, 14.4 mL de molibdato de amonio, 28.8 mL de ácido ascórbico 0.1M y 4.8 mL de tartrato de antimonio y potasio, finalmente se agitó la mezcla para homogeneizar. La curva patrón se realizó a partir del patrón de fosfato de 40 mg/L considerando las siguientes concentraciones 0.03, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mg/L y se realizó por triplicado. El procedimiento para la determinación de fosfatos se realizó de la siguiente manera, en un tubo de ensayo se midió 8.4 ml de muestras de agua y se agregó 1.6 ml del mix de los reactivos. Se incubó la reacción al menos 10 minutos y se realizó la lectura de fosfatos disueltos a una longitud de onda de 882 nm con un espectrofotómetro marca HACH®, modelo DR 5000.

Análisis de datos

Se empleó un diseño de experimento completamente al azar. La comparaciones se realizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) simple y las diferencias significativas se calcularon utilizando la diferencia menos significativa (Tukey HDS) en Statgraphics Centurion XVI (Statgraphics Technologies, Inc., VA, EE. UU.) con un 95% de confiabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que el pH osciló en un rango de 7.53 a 8.53 en las columnas de agua, observando cambios significativos a entre las diferentes profundidades, disminuyendo a mayor profundidad (Tabla 1). De igual forma, la temperatura mostró un comportamiento similar, siendo mayor en superficie (0m) y menor en las zonas más profundas (20 m), encontrándose en un rango de 19.77 °C a 26.20 °C. Por el contrario, los fosfatos disueltos mostraron un comportamiento inverso, encontrándose menores concentraciones en la superficie (0.018 mg/L) y mayores en las zonas más profundas (0.127 mg/L). En cuanto al potencial redox, se encontró en un rango de -28.23 mV a -88.50 mV, sin mostrar un comportamiento especial. Estos resultados nos muestran los cambios que pueden ocurrir en la columna de agua y cómo estos pueden influir en las funciones y rol ecológico en los lagos.

La temperatura y el pH del La Encantada fue mayor en la superficie, en contraste con las zonas más profundas donde la temperatura fue menor (Tabla 1). Este comportamiento puede explicarse tal como ha sido identificado donde, la exposición directa de la luz solar y a una mayor cantidad de organismos en la superficie favorece la fotosíntesis, por lo cual al haber mayor fuente de consumo de CO_2 , a los 0m y 10 m se obtuvieron los valores más altos de pH en el lago la Encantada, sin embargo, al ir aumentando la profundidad estos recursos también disminuyen gradualmente obteniéndose pH más bajos (Chang et al., 2022). Nuestros resultados son congruentes con lo encontrado con Chang et al. (2022) en el lago Lugu, donde encontraron el valor del pH del lago en columna de agua fue ligeramente alcalino, debido a la alta intensidad de luz en la superficie, donde muchos organismos acuáticos, por ende, la fotosíntesis fue fuerte y consumió una gran cantidad de CO_2 , lo que resultó en valor más alto de pH del agua de la superficie. Así mismo, el pH disminuyó en el agua inferior. Los valores del pH de 0 a 20m de profundidad, fue relativamente estable, entre 8.4 y 8.8, y disminuyó después de los 20m de profundidad. El aumento de temperatura en la parte superior del lago se debe a que en una estación cálida existe un incremento de la



temperatura del aire, lo cual provoca que el agua cerca de la superficie aumente su temperatura lo que resulta en estratificación (Koue et al., 2018).

Tabla 1. Parámetros físicoquímicos (mg/L) determinados en columnas de agua (0 a 20 metros de profundidad) del lago "La Encantada" en el PNLM.

	pH	Temperatura (°C)	ORP (mV)	PO ₄ (mg/L)
Sitio 1 (metros)				
0	8.53a	26.20a	-88.50e	0.018c
10	7.53e	20.03g	-31.30cd	0.012ab
15	7.56cde	19.87h	-30.41bc	0.088ab
20	7.58cd	19.77h	-28.90a	0.092ab
Sitio 2 (metros)				
0	8.53a	25.03c	-83.33e	0.018c
10	7.65b	21.57d	-31.33cd	0.076b
15	7.56cde	20.87e	-28.23a	0.085ab
20	7.57cde	20.53f	-28.80a	0.081ab
Sitio 3 (metros)				
0	8.50a	25.40b	-84.07e	0.019c
10	7.54de	20.30f	-28.33a	0.093ab
15	7.61bc	20.47f	-32.30d	0.097ab
20	7.59c	20.07g	-30.03b	0.127a
Tukey	0.044	0.147	1.112	0.049

Letras minúsculas: Comparación de medias entre las diferentes profundidades. Las cantidades son promedio de 3 repeticiones. Las diferencias estadísticas se obtuvieron mediante análisis de múltiples rangos utilizando el método de Tukey HDS con un 95% de confiabilidad.

Por otro lado, de otoño a invierno la temperatura del aire desciende y enfría la temperatura del agua en la capa superficial, motivo por el cual el agua de la capa superficial alcanza las temperaturas de las capas inferiores. Además, en invierno, la temperatura del aire es mucho menor que la del agua en todas las capas, por lo que la temperatura del agua en la capa inferior se enfría por debajo de la del verano (Anderson et al., 2021).

En el lago "La Encantada" se observa un patrón claro de aumento de fosfato con la profundidad. Los valores superficiales a 0 metros son bajos, en torno a 0.018–0.019 mg/L, mientras que a 20 metros ascienden hasta 0.127 mg/L, sobre todo en el Sitio 3. Este comportamiento refleja un proceso característico de lagos estratificados donde la combinación de condiciones físicoquímicas, como el pH, el potencial redox y la temperatura, determinan la dinámica del fósforo en la columna de agua. Se ha identificado en otros lagos eutróficos que, bajo condiciones anóxicas en el hipolimnion, los óxidos de hierro y manganeso se reducen y liberan el fosfato adsorbido, lo que explica la acumulación en las capas profundas (Nürnberg, 2009). Además, se ha identificado que este proceso de carga interna constituye una de las principales fuentes de fósforo para la columna de agua, incluso en sistemas con control externo de nutrientes. En nuestros datos, el ORP negativo a lo largo de toda la columna refuerza la hipótesis de condiciones reductoras que favorecen



este mecanismo (Orihel et al., 2017). Por otro lado, el bajo contenido de fosfato en superficie se asocia a procesos de coprecipitación con calcita impulsados por la fotosíntesis en aguas alcalinas, lo cual coincide con el pH elevado de ~8.5 registrado en la capa superficial. Estudios recientes en lagos ricos en depósito de carbono confirman que, bajo alta alcalinidad, la saturación con CaCO_3 inmoviliza el fósforo en el epilimnion (Escoffier et al., 2023). De esta forma, la combinación de retención superficial por calcita y liberación profunda por reducción de Fe explica el fuerte gradiente vertical de fosfato que obtuvimos en nuestro estudio. Estos resultados son relevantes porque indican que el fósforo acumulado en el hipolimnion puede reincorporarse a la zona fótica durante los eventos de mezcla lo que podría favorecer la floración de fitoplancton, cianobacterias y cambios en la estructura trófica de los lagos (Yankova et al., 2017). Estudios recientes en el Parque Nacional Lagunas de Montebello muestran que la dinámica microbiana y las condiciones tróficas de los lagos están estrechamente ligadas a estos gradientes de nutrientes (Alegría-Gómez et al., 2023). Por lo tanto, los resultados obtenidos evidencian un proceso activo de carga interna que, junto con el pH y el potencial redox, regulan la disponibilidad de fósforo en la columna de agua y debe considerarse como un factor crítico tanto en el funcionamiento ecológico del lago como en el diseño de estrategias de conservación.

CONCLUSIONES

Las condiciones fisicoquímicas evaluadas en la columna de agua del lago La Encantada evidencian una marcada estratificación térmica y química que influye de manera directa en la dinámica de nutrientes, observándose que la temperatura y el pH son mayores en la superficie y disminuyen conforme aumenta la profundidad, mientras que los fosfatos muestran un comportamiento inverso, con concentraciones más altas en el hipolimnion asociadas a procesos de liberación interna desde los sedimentos bajo condiciones reductoras. El potencial redox negativo a lo largo de la columna refuerza este comportamiento y confirma la existencia de microambientes anóxicos que favorecen la solubilización de fósforo, lo cual representa un aporte interno significativo para la productividad del lago. Los resultados permiten concluir que la interacción entre estratificación, condiciones redox y procesos geoquímicos de fósforo determinan la distribución vertical de nutrientes, y que el lago La Encantada presenta un proceso activo de carga interna de fósforo que constituye un factor clave en su funcionamiento ecológico y repercute en la coloración de los lagos, aportando al conocimiento sobre el rol de los sedimentos y la columna de agua en la regulación de la calidad y la dinámica trófica de los ecosistemas lacustres kársticos.

AGRADECIMIENTOS

Josué Alegría-Gómez agradece la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México (SECIHTI), por la beca de doctorado número 920660 y el Proyecto aprobado de la Convocatoria de apoyos únicos otorgados a los integrantes vigentes del Sistema Estatal Investigadores 2025 de la Agencia Digital Tecnológica del Estado de Chiapas.

REFERENCIAS

Alegría-Gómez, J., Castañón-González, J.H., Hernández-García, J.A. et al. Changes in the abundance and diversity of bacterial and archaeal communities at different depths in a eutrophic freshwater lake in



- southwestern Mexico. *Environ Sci Pollut Res* 30, 98362–98376 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29380-1>
- Anderson, E.J., Stow, C.A., Gronewold, A.D. et al. La inversión estacional y los cambios en la estratificación impulsan el calentamiento de las aguas profundas en uno de los lagos más grandes de la Tierra. *Nat Commun* 12, 1688 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21971-1>
- Boegman, L. (2009). Currents in stratified water bodies 2: Internal waves. *Encyclopedia of inland waters*, 1, 539-558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00067-0>
- Boehrer, B., & Schultze, M. (2008). Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2). <https://doi.org/10.1029/2006RG000210>
- Chang, F., Hou, P., Wen, X., Duan, L., Zhang, Y., & Zhang, H. (2022). Seasonal stratification characteristics of vertical profiles and water quality of Lake Lugu in Southwest China. *Water*, 14(16), 2554. <https://doi.org/10.3390/w14162554>
- Escoffier, N., Perolo, P., Many, G., Pasche, N. T., & Perga, M. E. (2023). Fine-scale dynamics of calcite precipitation in a large hardwater lake. *Science of the Total Environment*, 864, 160699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160699>
- Imdad, K., Sahana, M., Gautam, O., Chaudhary, A., Misra, S., Dwivedi, S., & Ahmed, R. (2025). Anthropogenic and hydroclimatic drivers of livelihood vulnerability in wetland communities: a geospatial and pragmatic assessment. *Water Resources Management*, 39(6), 2503-2525. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-04075-5>
- Koue, J., Shimadera, H., Matsuo, T., & Kondo, A. (2018). Evaluation of thermal stratification and flow field reproduced by a three-dimensional hydrodynamic model in Lake Biwa, Japan. *Water* 10 (47): 1–20. <https://doi.org/10.3390/w10010047>
- Ladwig, R., Hanson, P. C., Dugan, H. A., Carey, C. C., Zhang, Y., Shu, L., ... & Cobourn, K. M. (2021). Lake thermal structure drives interannual variability in summer anoxia dynamics in a eutrophic lake over 37 years. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 1009-1032. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1009-2021>
- Nürnberg, G. K. (2009). Assessing internal phosphorus load—problems to be solved. *Lake and Reservoir Management*, 25(4), 419-432. <https://doi.org/10.1080/00357520903458848>
- Orihel, D. M., Baulch, H. M., Casson, N. J., North, R. L., Parsons, C. T., Seckar, D. C., & Venkiteswaran, J. J. (2017). Internal phosphorus loading in Canadian fresh waters: a critical review and data analysis. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 74(12), 2005-2029. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0500>
- Poikane, S., Kelly, M. G., Free, G., Carvalho, L., Hamilton, D. P., Katsanou, K., ... & Irvine, K. (2024). A global assessment of lake restoration in practice: New insights and future perspectives. *Ecological Indicators*, 158, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111330>
- Wang, B., Ma, Y., Wang, Y., Lazhu, Wang, L., Ma, W., & Su, B. (2023). Analysis of lake stratification and mixing and its influencing factors over high elevation large and small lakes on the Tibetan Plateau. *Water*, 15(11), 2094. <https://doi.org/10.3390/w15112094>



Innovación sostenible: síntesis de acetato y sulfato de celulosa a partir de semillas de Mango (*Mangifera indica*) para su uso como polímeros alternativos

Ovando-Roblero, Amet¹ (0000-0001-9155-9309), Vera-Graziano, Ricardo² (0000-0003-2870-9831), Cruz-Rodríguez, Rosa Isela¹ (0000-0002-4743-9112), Luján-Hidalgo, María Celina¹ (0000-0002-5720-9652), Meza-Gordillo, Rocío^{1*} (0000-0002-3975-7372)

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; (A.O.R.), (R.I.C.R.), (M.C.L.H.), (R.M.G.).

² Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Circuito Exterior S/N Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México; (R.V.G.).

* Autor por correspondencia: rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

En este estudio, se extrajo celulosa a partir de semillas de mango y se realizó su derivatización química para obtener acetato de celulosa (CA) y sulfato de celulosa (SC), con el objetivo de desarrollar materiales de alto valor añadido a partir de recursos renovables. La síntesis de CA se llevó a cabo mediante acetilación heterogénea, empleando anhídrido acético como agente acetilante, mientras que la obtención de SC se efectuó utilizando ácido clorosulfónico como agente sulfatante. Los productos derivados se caracterizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis elemental, difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los espectros FTIR confirmaron la incorporación exitosa de los grupos acetilo y sulfato a la estructura de la celulosa, con grados de sustitución de 2.89 y 0.77, respectivamente. La DRX evidenció una disminución de la cristalinidad hasta un 35.20 % en ambos derivados, mientras que los análisis térmicos mostraron una mayor estabilidad térmica, con temperaturas de degradación de 343 °C para CA y 346 °C para SC.

Estos hallazgos demuestran el potencial de la celulosa proveniente de semillas de mango como materia prima renovable para la producción de polímeros con mayor solubilidad y estabilidad térmica, posicionándola como una alternativa prometedora para aplicaciones en diversos campos.

Palabras clave: Derivatización química, residuos, biopolímeros, valorización.

INTRODUCCIÓN

La celulosa es el polisacárido más abundante en la Tierra y constituye el componente principal de la pared celular en plantas, algas y hongos, representando entre el 35 % y el 50 % de estas fibras naturales (Bamba



et al., 2023; Pinto et al., 2022). Se trata de un homopolímero lineal de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$, en el que las unidades de anhidroglucosa están enlazadas mediante enlaces glicosídicos β -(1,4). Gracias a sus propiedades versátiles como bajo peso, no toxicidad, resistencia mecánica, naturaleza hidrófila e higroscópica, biodegradabilidad y reciclabilidad, la celulosa es adecuada para múltiples aplicaciones, que incluyen la industria alimentaria, la fabricación de textiles y papel, el tratamiento de aguas y su uso como biomaterial (Baghel et al., 2021; Kamel & Khattab, 2020).

Sin embargo, el uso extensivo de la celulosa en sectores como la agricultura, la silvicultura y la industria papelera genera anualmente volúmenes considerables de residuos lignocelulósicos. Se estima que cada año se producen más de 2 Gt de estos desechos, los cuales, en su mayoría, carecen de una gestión adecuada, contribuyendo significativamente a problemáticas ambientales (Bamba et al., 2023; Pinto et al., 2022). Una fracción considerable de estos residuos es eliminada de forma no regulada, ocasionando fenómenos de eutrofización en aguas superficiales y subterráneas. De forma aún más crítica, una gran proporción es incinerada como combustible, liberando cantidades sustanciales de gases de efecto invernadero; se calcula que el CO_2 emitido por esta práctica representa aproximadamente el 18 % de las emisiones globales totales (Xu et al., 2021).

Sin embargo, su escasa solubilidad en diversos disolventes orgánicos ha limitado significativamente su rango de aplicaciones potenciales (Ribeiro et al., 2019; Tiwari et al., 2019). En este contexto, la modificación química de la biomasa lignocelulósica mediante la incorporación de grupos funcionales de bajo peso molecular constituye una estrategia eficaz para mejorar su solubilidad y, en consecuencia, ampliar su rango de aplicaciones potenciales (Hamza, 2017) y transformarlos en polímeros de alto valor añadido, contribuyendo así a mitigar las principales problemáticas ambientales globales derivadas de la contaminación por plásticos sintéticos. En particular, las aplicaciones de la celulosa y sus diversos derivados han suscitado creciente interés debido a sus propiedades intrínsecas, tales como biodegradabilidad, biocompatibilidad y sostenibilidad (Shaikh et al., 2022).

Resulta fundamental explorar nuevas fuentes de recuperación y reciclaje de celulosa, así como evaluar la viabilidad de su transformación en derivados de alto valor añadido, tales como el sulfato de celulosa y el acetato de celulosa (Kouadri et al., 2023). El acetato de celulosa (AC) constituye uno de los derivados más relevantes de la celulosa, caracterizándose por su durabilidad, costo competitivo, termoplaticidad, biocompatibilidad, elevada transparencia óptica y rigidez mecánica (Lakra et al., 2021; Lukanina et al., 2018; Rajeswari et al., 2020; Tedeschi et al., 2018). Por estas razones, el acetato de celulosa ha sido ampliamente empleado en diversas aplicaciones, tales como productos médicos y farmacéuticos (apósitos para heridas, sustitutos dérmicos y andamios tisulares para promover la cicatrización), recubrimientos y bioplásticos, membranas de filtración para distintos procesos de separación (diálisis, hemodiálisis, separación de gases, ultrafiltración y ósmosis inversa), así como en la fabricación de películas, fibras, filtros, envases de alimentos, aditivos alimentarios, textiles, cigarrillos, papel y otros productos industriales (dos Santos et al., 2021; Kouadri et al., 2023).

El sulfato de celulosa (SC) es un éster obtenido mediante sulfatación, cuya modificación confiere a la molécula una estructura análoga a la de los glucosaminoglucanos (GAG), favoreciendo la unión de factores de crecimiento y la formación de tejido cartilaginoso. En comparación con la celulosa nativa, el SC presenta mayor solubilidad en agua y exhibe propiedades biocompatibles, así como actividad antiviral, antibacteriana, antimicrobiana y anticoagulante (Oprea & Voicu, 2020; Palaninathan et al., 2018; Torlopov et al., 2020). Estas propiedades convierten al sulfato de celulosa en un material altamente prometedor para



aplicaciones biomédicas, incluyendo recubrimientos hemocompatibles, implantes sólidos, andamios para ingeniería de tejidos e hidrogeles, así como en bioimpresión (Strätz et al., 2020).

El aprovechamiento de residuos agroindustriales, como los generados por el mango (*Mangifera indica* L.), uno de los cultivos frutales más productivos en México con 2,485,545 toneladas anuales (FAOSTAT, 2022), representa una estrategia sostenible para mitigar el impacto ambiental. En particular, las semillas de mango, ricas en celulosa, constituyen un recurso subutilizado que, al igual que otros residuos agroindustriales por ejemplo, cáscaras de cebolla o zanahoria, puede transformarse en productos de alto valor añadido mediante procesos de valorización química y biotecnológica (Hernández-Varela et al., 2020). En particular, el mango se posiciona entre los cultivos frutales de mayor relevancia productiva en México, con una producción aproximada de 2,485,545 toneladas anuales (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, 2018). No obstante, la elevada producción, sumada a la limitada apertura de los mercados nacionales e internacionales y a la incidencia de plagas, ha propiciado un aumento significativo de los residuos postcosecha, constituyendo un problema tanto ambiental como económico (Coelho et al., 2018).

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto es sintetizar acetato y sulfato de celulosa a partir de semillas de mango mediante procesos de derivatización química, evaluando sus propiedades físicas, químicas y térmicas en comparación con la celulosa nativa. Este enfoque pretende desarrollar polímeros alternativos sostenibles, promoviendo una economía circular que contribuya a mitigar los impactos ambientales y económicos asociados con los residuos agroindustriales, consolidando la celulosa como un recurso estratégico para el desarrollo de materiales funcionales y sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Los frutos de mango (*M. indica* L.) cv. “Gold” se obtuvieron del huerto “Pueblo Viejo”, ubicado en la latitud 16.342093 y la longitud -94.180030 en el municipio de San Pedro Tapanatepec, Oaxaca, México. Para eliminar la pulpa restante de las semillas, estas se cortaron en trozos de aproximadamente 1 cm² y se mezclaron con NaOH 1 M durante 24 h. Posteriormente, la mezcla se filtró y se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. El material se secó en un horno a 50 °C durante 24 h, se molió en un molino eléctrico de granos y se tamizó a través de una malla 100, obteniendo un tamaño de partícula de 0.149 mm.

Extracción de la celulosa de semilla de mango

El procedimiento de extracción consistió en añadir 100 mL de NaOH al 24.58 % a 3 g de harina de semilla de mango, agitar la mezcla a 900 rpm con un agitador magnético y mantener la temperatura a 30°C durante 2 h. Posteriormente, la mezcla se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, se filtró y se sometió a un tratamiento de blanqueo añadiendo 100 mL de solución de NaClO al 1.5%, manteniéndola a la temperatura a 50 °C durante 1 h, con agitación a 900 rpm. Posteriormente, la mezcla se filtró y se secó a 60 °C. El rendimiento de celulosa (%) se calculó mediante la ecuación (1).



$$\text{Rendimiento (\%)} = (\text{Peso de la celulosa tratada} / \text{Peso de la harina de semilla de mango}) \times 100$$

(1)

Síntesis de acetato de celulosa (CA) y sulfato de celulosa (CS)

Para la síntesis de acetato de celulosa, se mezclaron 10 g de celulosa con 24 mL de ácido acético glacial en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. La mezcla se agitó a 37.8 °C durante 1 h. Posteriormente, se añadieron 40 mL de ácido acético glacial y 0.08 mL de ácido sulfúrico, manteniendo la agitación durante 45 min. La mezcla se enfrió a 18.3 °C, y se incorporaron 28 mL de anhídrido acético y 0.6 mL de ácido sulfúrico. Posteriormente, se elevó la temperatura a 35 °C y se agitó durante 1.5 h. A continuación, se agregó lentamente una solución de 10 mL de agua y 20 mL de ácido acético glacial durante 1 h bajo agitación constante. La mezcla se mantuvo en agitación durante 24 h y se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro (7.0) (Hadinata et al., 2019).

Para la sulfatación, se suspendieron 15 g de celulosa en 750 mL de N, N-dimetilformamida (DMF) y se agitó durante 14 h. La mezcla se calentó a 50 °C, y se añadieron 4.5 equivalentes de ácido clorosulfónico por unidad de glucosa de celulosa durante 30 min, manteniendo la agitación por 5 h. El producto se precipitó con una solución saturada de acetato de sodio-etanol y se lavó tres veces con la misma solución. El sobrenadante se lavó con etanol hasta alcanzar un pH de 7.0. El precipitado se disolvió en agua y se purificó mediante diálisis utilizando una membrana de celulosa (Sigma-Aldrich, 49 mm × 79 mm, tamaño de poro de 14 kDa) contra 50 volúmenes de agua destilada durante 72 h. Finalmente, los productos obtenidos se liofilizaron (Horikawa et al., 2015; Zeng et al., 2023).

Determinación del grado de sustitución (DS) del acetato de celulosa y del sulfato de celulosa

Los espectros de infrarrojo de la celulosa tratada, CA y CS se registraron mediante un espectrofotómetro FTIR Nicolet™ (Thermo Scientific, Massachusetts, EE. UU.). Las mediciones se realizaron en un rango de 650 a 4000 cm⁻¹, con una resolución de 4 cm⁻¹ (Kouadri et al., 2023). Las muestras se analizaron directamente utilizando una celda ATR de diamante.

Los espectros FT-IR se utilizaron para determinar el nivel de acetilación. Los valores de DS de los productos de celulosa se evaluaron utilizando las ecuaciones 1 y 2 (Homem & Amorim, 2019) el porcentaje del grupo acetilo de CA (GA, %) se calculó a partir de los datos FTIR. El cociente entre las absorbancias de los picos a 1750 cm⁻¹, asignadas al estiramiento del enlace CO del éster carbonílico en CA y a 3400 cm⁻¹, asignadas al enlace OH de la celulosa, da como resultado el grado de acetilación GA (%) según la ecuación 1.

$$GA = 43.69 (1 - e^{-0.974R})^{2.153} \quad (1)$$

Donde R es el cociente entre la absorbancia de las bandas CO y OH. El grado de sustitución (GS) se obtiene a partir del valor del porcentaje de grupos acetilo (% GA) utilizando la ecuación 2.



$$GS = \frac{162 \times \%AG}{43 \times 100 - ((43 - 1) \times \%AG)} \quad (2)$$

En el contexto de la celulosa, la masa molar del grupo acetilo se establece en 43 g mol^{-1} , mientras que el peso molecular de la unidad de anhidroglucosa es de 162 g mol^{-1} .

Para determinar el grado de sustitución del sulfato de celulosa, se analizaron los contenidos de azufre de las muestras utilizando un analizador de combustión elemental modelo Vario Micro Cube (Elementar, Hanau, Alemania). Se pesaron 5 mg de muestra, que luego se encapsularon en estaño. Se introdujo al equipo, donde se quemó de forma completa e instantánea a 1150°C , utilizando oxígeno y helio como gas de transporte. El grado de sustitución (GS) se calculó mediante la ecuación 3 (Sirviö et al., 2019).

$$GS = \frac{S \times 162.5}{3206 - (S \times 97.10)} \quad (3)$$

Donde S representa el contenido de azufre. La masa molar de la unidad de anhidroglucosa se establece en $162.15 \text{ g mol}^{-1}$, mientras que la masa molar del grupo sulfato de amonio es de 97.10 g mol^{-1} .

Difracción de rayos X (XDR)

Los patrones de difracción de rayos X de las muestras de celulosa, CA y CS se obtuvieron utilizando un difractómetro de polvo (Rigaku, ultima IV, Tokio, Japón) utilizando radiación Cu-K α como fuente a 44 kV y 300 mA. La radiación dispersa se detectó en el rango de $2\theta=10-40^{\circ}$, a una velocidad de escaneo de $2^{\circ}/\text{min}$ (Maryana et al., 2022). El grado de cristalinidad (IC, %) se calculó utilizando el método de Segal (Segal et al., 1959). El índice de cristalinidad (IC, %) se calculó utilizando la ecuación 4. Donde I_{002} es la intensidad de difracción máxima (002) a un valor de 2θ de aproximadamente 22.2° , mientras que I_{am} es la intensidad de difracción a un valor de 2θ de aproximadamente 18° .

Donde I_{002} es la intensidad de difracción máxima (002) a un valor de 2θ de aproximadamente 22.2° , mientras que I_{am} es la intensidad de difracción a un valor de 2θ de aproximadamente 18° .

$$CI(\%) = \frac{(I_{002} - I_{am})}{I_{002}} \times 100 \quad (4)$$

Análisis termogravimétrico (TGA)

El TGA se realizó utilizando un equipo TGA (TA instrument Q500IR, Delaware, EE. UU.). Aproximadamente 8.5 mg de las muestras nativas y derivatizadas se cargaron en un recipiente de cerámica



y se calentaron en un rango de 20 a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min bajo atmósfera de nitrógeno. La pérdida de peso de las muestras se registró en función de la temperatura y se caracterizó mediante una curva TG. La curva termogravimétrica derivada (DTG) se utilizó para enfatizar la zona de temperatura donde ocurrió cada fenómeno (Isola et al., 2024).

Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El comportamiento térmico de las muestras de celulosa y sus derivados se evaluó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) (TA instrument, DSC Q-2000, Delaware, EE. UU.). Las muestras (~1 mg) se colocaron en recipientes de alúmina y se realizaron análisis en 3 ciclos de calentamiento para eliminar la señal de evaporación de agua y compuestos volátiles, el primero de 25 a 120°C, posteriormente se enfrió a 25°C y finalmente de 25°C a 300°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min bajo atmósfera de nitrógeno (López-Calderón et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación del grado de sustitución (DS) del acetato y sulfato de celulosa

El espectro FTIR de la celulosa sulfatada obtenida a partir de semillas de mango (Figura 1), revela características distintivas que confirman la modificación química de la celulosa. Las señales observadas a 3400 cm⁻¹ y 2900 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de estiramiento de los grupos O-H y C-H, respectivamente (Bamba et al., 2023; Shaikh et al., 2022). Además, se observaron bandas a 1240 cm⁻¹ y 813 cm⁻¹, correspondientes al estiramiento asimétrico de O=S=O y al estiramiento C-O-S, respectivamente. Estas señales, ausentes en el espectro de la celulosa nativa, confirman la sulfatación exitosa de la molécula (Sirviö et al., 2019). La banda a 1640 cm⁻¹ indica la presencia de agua, y su intensidad sugiere una mayor hidrofiliidad del compuesto, atribuible a la incorporación de grupos sulfato en la estructura de la celulosa. Por otro lado, el pico cercano a 2895 cm⁻¹ se asocia con la vibración de estiramiento de los grupos sulfato ligados a C-H (Song et al., 2018). La disminución de la intensidad de este pico, en comparación con la celulosa no modificada, refleja la unión de los grupos sulfato (Horikawa et al., 2015; Muhitdinov et al., 2019).

Para el espectro FTIR del acetato de celulosa (CA), las bandas a 1756 cm⁻¹ y 1754 cm⁻¹ corresponden a la vibración del enlace C=O del grupo éster del acetato (Latiffah et al., 2024), señales ausentes en los espectros de celulosa sin modificar. Asimismo, la banda a 1370 cm⁻¹ refleja la vibración del enlace C-H del grupo acetilo (Çanga & Dudak, 2019; Shaikh et al., 2022), mientras que la señal a 1230 cm⁻¹ se atribuye a la vibración del grupo C-O que conecta la celulosa con el grupo acetilo (Homem & Amorim, 2019; Shaikh et al., 2022). Comparado con la celulosa original, el espectro del derivado acetilado muestra una notable reducción de la banda a 3400 cm⁻¹, correspondiente al grupo hidroxilo, debido a su sustitución por grupos acetilo (Candido et al., 2017). Estas observaciones confirman la síntesis exitosa del acetato de celulosa (Hadinata et al., 2019). La ausencia de absorción en la región de 1840–1760 cm⁻¹ indica la ausencia de anhídrido acético sin reaccionar en la muestra. Asimismo, la falta de una banda alrededor de 1700 cm⁻¹, correspondiente al grupo carboxilo, confirma que el producto se encuentra libre de ácido acético residual (Battisti et al., 2018).

La muestra de acetato de celulosa presentó un grado de sustitución (GS) de 2.89. El GS, que indica el número promedio de grupos hidroxilo reemplazados por grupos acetilo por unidad de glucósido, puede variar entre 0 y 3, y constituye un factor determinante que afecta directamente la solubilidad y la degradabilidad del material. Los derivados con un GS bajo muestran mayor solubilidad en disolventes polares y biodegradabilidad superior, mientras que aquellos con un GS elevado son solubles en disolventes orgánicos como diclorometano, cloroformo o acetona (Ribeiro et al., 2021).

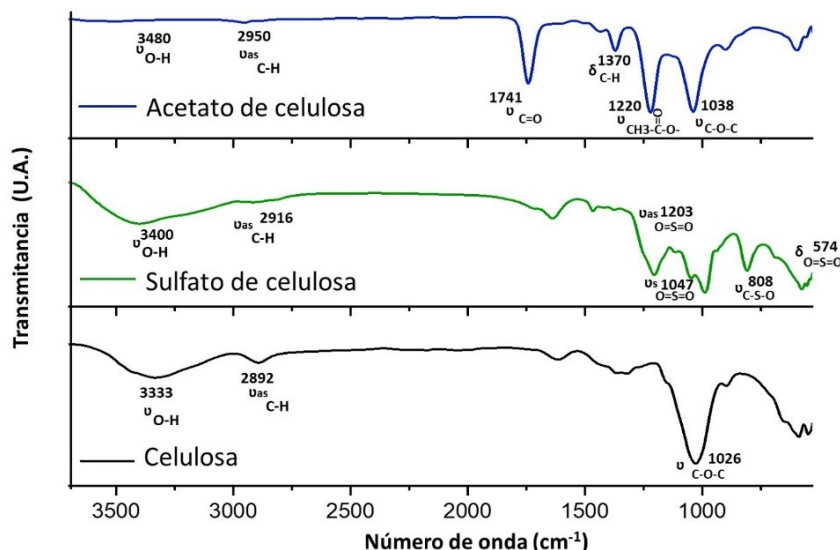


Figura 1. Espectro infrarrojo de celulosa nativa, acetato de celulosa y sulfato de celulosa.

Los resultados del análisis elemental de la muestra de celulosa sulfatada se presentan en el Cuadro 1. Se observó la presencia exclusiva de carbono y oxígeno, lo cual puede atribuirse a la disposición homogénea de las unidades de β -D-glucopiranosas en la estructura polimérica (Palaninathan et al., 2018). Asimismo, se detectó la presencia de azufre y nitrógeno en la muestra. La señal de nitrógeno se atribuye a la matriz orgánica del material celulósico, mientras que la presencia de azufre confirma la sustitución de los grupos hidroxilo, evidenciando la funcionalización exitosa de la celulosa (Song et al., 2018). El contenido de azufre en la muestra de celulosa sulfatada se cuantificó en 10.42 %. A partir de este valor, se determinó un grado de sulfatación de 0.77, calculado mediante la Ecuación 3 descrita previamente

Cuadro 1. Composición elemental de celulosa de semilla de mango sulfatada y grado de sustitución.

Muestra	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	DS
CSMS	2.06	24.49	5.81	10.42	0.77



Difracción de rayos X (XDR)

La Figura 2 presenta los difractogramas de rayos X (XRD) de la celulosa nativa, el acetato de celulosa (CA) y la celulosa sulfatada (SC). En el caso de la celulosa nativa, se observaron picos a 15.82° , 22.48° y 34.63° , los cuales se atribuyen a la estructura cristalina característica de la celulosa. Para el acetato de celulosa, los picos máximos se localizaron en 8° , 10.1° y 17.8° , reflejando el patrón de difracción asociado a la reorganización cristalina derivada de la acetilación de la molécula (Huda et al., 2019; Sezali et al., 2023). El pico principal observado en el acetato se registró a 8° y demuestra un desorden en la celulosa debido a la sustitución de grupos hidroxilo por grupos acetilo (Nabili et al., 2017), de igual manera la ausencia del pico a 22° indicó que la cristalinidad de la celulosa disminuyó durante el proceso de acetilación (Maryana et al., 2022). Este patrón sugiere un aumento en la distancia entre las fibrillas y una reorganización de las estructuras microfibrilares, lo que evidencia la incorporación efectiva de los grupos acetilo en la matriz polimérica de la celulosa (Barud et al., 2008; Kouadri et al., 2023).

La disminución de la cristalinidad del acetato de celulosa (CA) se confirmó mediante el Índice de Cristalinidad (IC), el cual mostró un valor de 10.26 % para CA, en comparación con el 70.48 % registrado para la celulosa nativa, representando una reducción del 60.22 %. Esta disminución se atribuye a la sustitución de los grupos hidroxilo por grupos acetilo, cuya mayor volumetría interfiere en los enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares, incrementando así el carácter amorfo del material (Das et al., 2014). Como resultado, el CA exhibe mayor capacidad de absorción de agua, lo cual es favorable para su biodegradabilidad, ya que los polímeros amorfos se degradan más rápidamente que los cristalinos (Battisti et al., 2018; Sodeinde et al., 2020).

En el difractograma de la celulosa sulfatada (SC), se identificaron los planos cristalográficos de la celulosa I, como (100), (110), (200) y (004), con picos en 2θ aproximadamente a 14.9° , 16.1° , 22.5° y 34.3° (Kassab et al., 2019; Pires et al., 2023). Estos resultados sugieren que la incorporación de grupos sulfato se produjo mediante una reacción heterogénea en la superficie de la celulosa. A pesar de los cambios morfológicos observados tras la sulfatación, el Índice de Cristalinidad (IC) de la celulosa sulfatada (SC) se redujo a 35.20 %, lo que representa una disminución del 35.28 % en comparación con la celulosa nativa. La presencia de los grupos sulfato, junto con la desintegración mecánica de las fibras, contribuye al incremento del carácter amorfo al interrumpir los enlaces de hidrógeno entre las regiones cristalinas y amorfas (Jaouahar et al., 2024; Kazachenko et al., 2023).

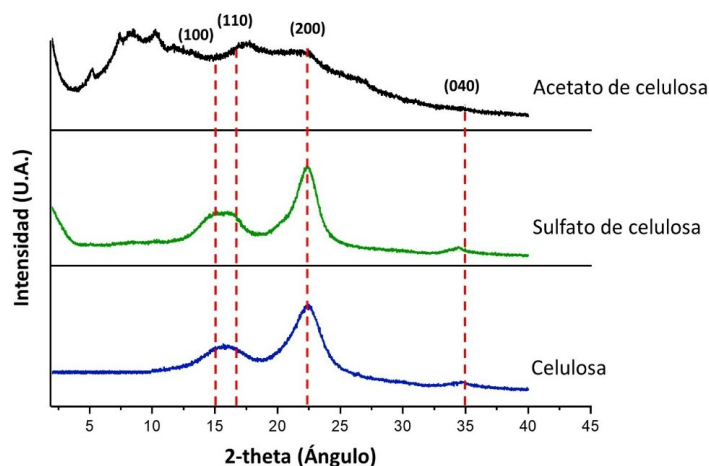


Figura 2. Espectro RX de celulosa nativa, acetato de celulosa y sulfato de celulosa.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) se utilizó para evaluar la estabilidad térmica de la celulosa nativa, el acetato de celulosa (CA) y la celulosa sulfatada (SC). Esta técnica permite monitorear la pérdida de masa de las muestras con el aumento de la temperatura, proporcionando información detallada sobre su comportamiento térmico y los procesos de degradación asociados (Arumugam et al., 2021).

La Figura 3 presenta las curvas TGA y DTG de la celulosa nativa, el acetato de celulosa (CA) y la celulosa sulfatada (SC). La celulosa nativa exhibe un comportamiento de degradación térmica en dos etapas principales. La primera etapa, comprendida entre 41 y 120 °C, muestra una pérdida de masa del 4.5 %, atribuida a la desorción de humedad adsorbida en la superficie de la muestra y a la eliminación de agua quimisorbida a través de enlaces de hidrógeno (Iyabode et al., 2021; Ochica et al., 2017). La segunda etapa, comprendida entre 205 y 399 °C, presentó una pérdida de masa máxima del 69.6 %, con un pico en la curva DTG a 325 °C, asociado a la pirólisis de la celulosa en su fase cristalina. La menor cristalinidad de los polímeros favorece su descomposición térmica, en concordancia con lo reportado previamente en la literatura (Battisti et al., 2018). Por otro lado, la hemicelulosa, debido a sus grupos acetilo, muestra una degradación térmica entre 220 y 300 °C (Agwuncha et al., 2020), mientras que la lignina, con su estructura de anillos aromáticos, exhibe un rango de degradación más amplio, de 250 a 700 °C (Dube et al., 2023; Tarchoun et al., 2019).

El análisis térmico del acetato de celulosa (CA) revela tres etapas de degradación. La primera, entre 35 y 100 °C, muestra una pérdida de peso del 2.43%, relacionada con la desorción de agua de la estructura del polisacárido (Çanga & Dudak, 2019). La segunda etapa, entre 163 y 233 °C, se asocia con una pérdida de masa debida a la hidrólisis parcial de las cadenas esterificadas del acetato de celulosa (Jiang et al., 2023). La tercera etapa, entre 231 y 421 °C, registra una pérdida de peso máxima del 69.6%, con un pico en DTG a 343 °C, atribuida a la degradación del esqueleto de celulosa, que incluye procesos de deshidratación,

despolimerización y descomposición de unidades de glucosa, dejando residuos carbonosos (Ribeiro et al., 2021).

En el caso de la celulosa sulfatada (SC), la degradación térmica se desarrolla en tres etapas. La primera, comprendida entre 35 y 100 °C, presenta una pérdida de masa del 3.11 %, atribuida a la deshidratación de las unidades de glucosa presentes en la estructura polimérica (Qin et al., 2014). La segunda etapa, comprendida entre 137 y 303 °C, muestra una pérdida de masa máxima del 40 %, con un pico en la curva DTG a 243 °C, atribuida a la descomposición de los grupos sulfatados y a la ruptura parcial de la estructura polimérica (Jaouahar et al., 2024). Finalmente, la tercera etapa, comprendida entre 303 y 412 °C, muestra una pérdida de peso del 20.19 %, con un pico en la curva DTG a 346 °C, atribuida a la degradación del esqueleto celulósico. En general, los derivados de celulosa (CA y SC) presentan una mayor estabilidad térmica en comparación con la celulosa nativa, ya que sus picos de degradación ocurren a temperaturas más elevadas. Este comportamiento se relaciona con la sustitución de los grupos hidroxilo por grupos acetilo y sulfato, los cuales, al introducirse en los carbonos C2 y C3 de la unidad de anhidroglucosa, generan un impedimento estérico que demanda mayor energía para la descomposición térmica (Araújo et al., 2020; Morgado & Frollini, 2011). En consecuencia, tanto el acetato de celulosa (CA) como la celulosa sulfatada (SC) exhiben una mayor resistencia térmica en comparación con la celulosa nativa. Este resultado destaca las ventajas de la funcionalización química, ya que la incorporación de grupos acetilo y sulfato confiere mayor estabilidad frente a la degradación térmica, favoreciendo su potencial uso en aplicaciones que requieren materiales más resistentes al calor (Sodeinde et al., 2020).

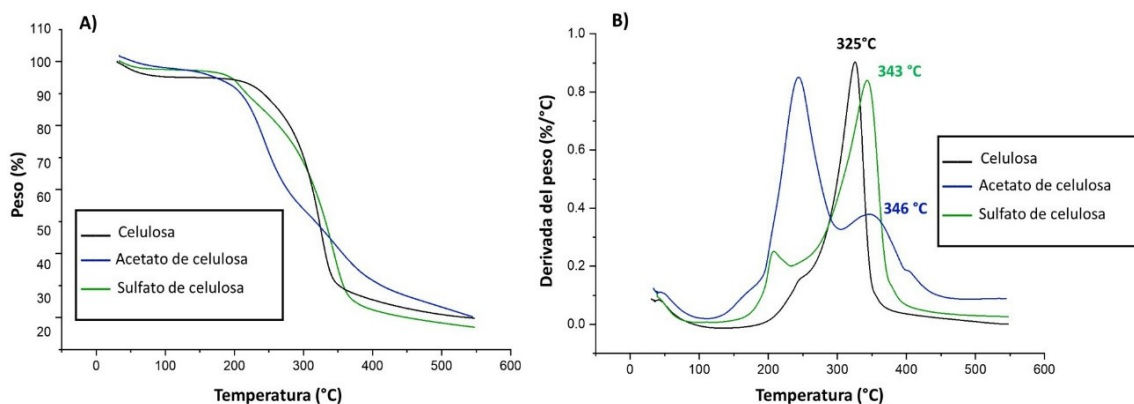


Figura 3. A) Análisis TGA de celulosa, acetato de celulosa y sulfato de celulosa y B) DTG de celulosa, acetato de celulosa y sulfato de celulosa.

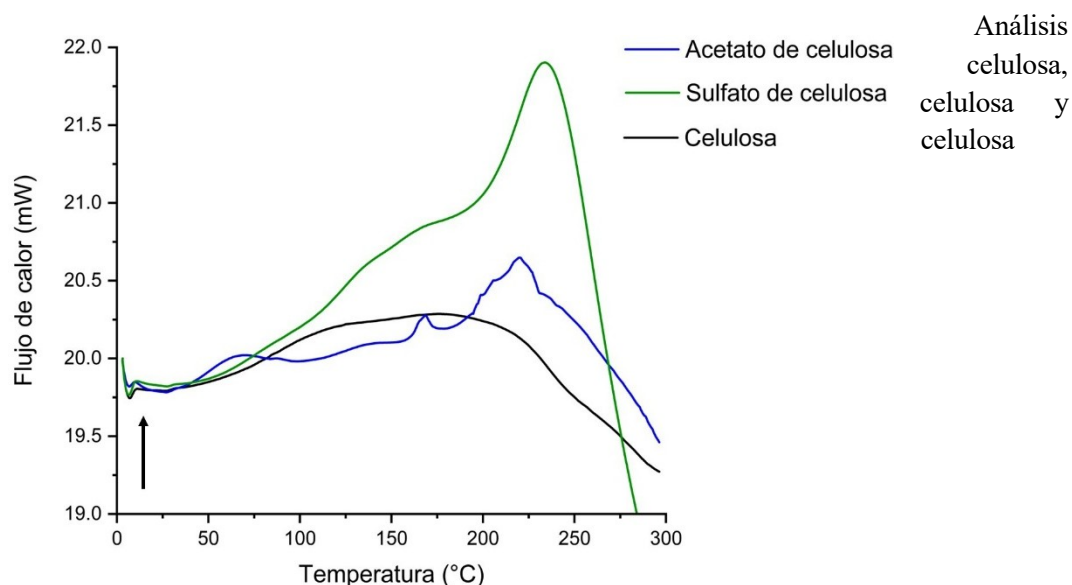
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis combinado de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría (TG) aporta información fundamental sobre el comportamiento térmico de las muestras de celulosa: celulosa nativa (CN), acetato de celulosa (AC) y celulosa sulfatada (SC). En la Figura 4 se presentan los resultados de DSC, donde se observan picos endotérmicos por debajo de 110 °C, asociados a la eliminación de agua adsorbida

y de otros líquidos residuales presentes en las muestras (Kathirselvam et al., 2019; Tarchoun et al., 2019). En la celulosa nativa, el perfil de DSC se mantiene estable hasta presentar un pico endotérmico pronunciado a 300 °C, correspondiente al inicio de la degradación térmica de la celulosa. La ausencia de picos exotérmicos o endotérmicos en el intervalo de 120 a 265 °C confirma la estabilidad térmica de las fibras en ese rango. Posteriormente, se observa un pico endotérmico más amplio entre 320 y 390 °C, característico de la descomposición térmica de las celulosas no tratadas (Worku et al., 2022).

Para el acetato de celulosa (AC), se muestra un evento endotérmico alrededor de 80 °C, asociado a la reorganización de cadenas moleculares en componentes amorfos y a la evaporación de agua. A 168 °C se detecta la transición vítrea, en concordancia con observaciones en la curva termogravimétrica, seguida de un pico exotérmico a 220 °C, atribuido a la cristalización de AC (Kouadri et al., 2023; Ribeiro et al., 2021). El sulfato de celulosa (SC) inicia su descomposición térmica a 235 °C, lo que marca el comienzo de una fase de degradación notable, tal como se evidencia en el análisis termogravimétrico (TG). Durante esta etapa, la curva TG muestra una pérdida de masa considerable que se extiende hasta aproximadamente 346 °C. La temperatura de inicio de la descomposición principal representa un parámetro clave para evaluar la estabilidad térmica de este material (Kazachenko et al., 2023). En este contexto, el SC demostró una mayor estabilidad térmica en comparación con las otras dos muestras de celulosa evaluadas.

Figura 4.
DSC de
acetato de
sulfato de



CONCLUSIONES

La celulosa extraída de la semilla de mango fue obtenida con éxito y derivatizada de manera eficiente. Los análisis de FTIR confirmaron la incorporación efectiva de grupos acetilo y sulfato, con grados de sustitución de 2.89 y 0.77, respectivamente. Esta modificación estructural se reflejó en una reducción de la cristalinidad a 35.20% tanto para el acetato de celulosa (CA) como para el sulfato de celulosa (SC), según los análisis de difracción de rayos X. Asimismo, el análisis térmico evidenció un aumento en la estabilidad térmica de los derivados, alcanzando temperaturas de degradación de 343 °C y 346 °C, respectivamente.



Estos resultados destacan a la celulosa de semilla de mango como una fuente renovable prometedora para la síntesis de polímeros con mayor solubilidad y estabilidad térmica, posicionándola como una alternativa viable para aplicaciones en diversos campos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México (SECIHTI) (beca 957352, Amet Ovando Roblero) y al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por su apoyo financiero (8848.20-P), así como al Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por los recursos proporcionados para la realización del proyecto.

REFERENCIAS

- Agwuncha, S. C., Owonubi, S., Fapojuwo, D. P., Abdulkarim, A., Okonkwo, T. P., & Makhatha, E. M. (2020). Evaluation of mercerization treatment conditions on extracted cellulose from shea nut shell using FTIR and thermogravimetric analysis. *Materials Today: Proceedings*, 38, 958–963. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.473>
- Araújo, D., Castro, M. C. R., Figueiredo, A., Vilarinho, M., & Machado, A. (2020). Green synthesis of cellulose acetate from corncob: Physicochemical properties and assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120865>
- Arumugam, M., Murugesan, B., Pandiyan, N., Chinnalagu, D. K., Rangasamy, G., & Mahalingam, S. (2021). Electrospinning cellulose acetate/silk fibroin/Au-Ag hybrid composite nanofiber for enhanced biocidal activity against MCF-7 breast cancer cell. *Materials Science and Engineering C*, 123(March), 112019. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112019>
- Baghel, R. S., Reddy, C. R. K., & Singh, R. P. (2021). Seaweed-based cellulose: Applications, and future perspectives. *Carbohydrate Polymers*, 267(May), 118241. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118241>



- Bamba, M., Assanvo, E. F., Kouassi, E. K. A., Soro, D., Ouattara, L. Y., Yao, K. B., Drogui, A. P., & Tyagi, D. R. (2023). Preparation and Characterization of Cellulose Triacetate from Cocoa Pod Husk. *BioResources*, 18(1), 1684–1698. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1684-1698>
- Barud, H. S., de Araújo Júnior, A. M., Santos, D. B., de Assunção, R. M. N., Meireles, C. S., Cerqueira, D. A., Rodrigues Filho, G., Ribeiro, C. A., Messaddeq, Y., & Ribeiro, S. J. L. (2008). Thermal behavior of cellulose acetate produced from homogeneous acetylation of bacterial cellulose. *Thermochimica Acta*, 471(1–2), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.02.009>
- Battisti, R., Hafemann, E., Claumann, C. A., Antonio, R., & Machado, F. (2018). Synthesis and Characterization of Cellulose Acetate from Royal Palm Tree Agroindustrial Waste. *Polymer Engineering and Science*, 1–8. <https://doi.org/10.1002/pen.25034>
- Candido, R. G., Godoy, G. G., & Gonçalves, A. (2017). Characterization and application of cellulose acetate synthesized from sugarcane bagasse. *Carbohydrate Polymers*, 167, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.057>
- Çanga, E. M., & Dudak, F. C. (2019). Characterization of cellulose acetate/gum Arabic fibers loaded with extract of *Viburnum opulus* L. fruit. *Lwt*, 110(April), 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.085>
- Coelho, C. C. S., Michelin, M., Cerqueira, M. A., Gonçalves, C., Tonon, R. V., Pastrana, L. M., Freitas-Silva, O., Vicente, A. A., Cabral, L. M. C., & Teixeira, J. A. (2018). Cellulose nanocrystals from grape pomace: Production, properties and cytotoxicity assessment. *Carbohydrate Polymers*, 192, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.023>
- dos Santos, A. E. A., dos Santos, F. V., Freitas, K. M., Pimenta, L. P. S., de Oliveira Andrade, L., Marinho, T. A., de Avelar, G. F., da Silva, A. B., & Ferreira, R. V. (2021). Cellulose acetate nanofibers loaded with crude annatto extract: Preparation, characterization, and in vivo



evaluation for potential wound healing applications. *Materials Science and Engineering C*, 118.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111322>

Dube, A. M., Daba, B. J., & Muleta, M. D. (2023). Optimized isolation and characterization of cellulose for extraction of cellulose nanocrystals from *Ensete ventricosum* pseudo-stem fibre using a two-stage extraction method. *Journal of Experimental Nanoscience*, 18(1).

<https://doi.org/10.1080/17458080.2023.2199989>

Hadinata, A. H., Ernawati, E. E., & Siahaan, A. R. (2019). Preparation and Characterization of Composite Cellulose Acetate/NaA Zeolite/Alumina Membrane and Its Application in Vetiver Oil's Pervaporation. *Jurnal Kimia Valensi*, 5(2), 169–176.

<https://doi.org/10.15408/jkv.v5i2.11698>

Hamza, S. E. E. (2017). MHD Flow of Cellulose Derivatives and Dilute Suspensions Rheology of Its Nanocrystals. *American Journal of Fluid Dynamics*, 7(1), 23–40.

<https://doi.org/10.5923/j.ajfd.20170701.03>

Hernández-Varela, J. D., Chanona-Pérez, J. J., Calderón Benavides, H. A., Cervantes Sodi, F., & Vicente-Flores, M. (2020). Effect of ball milling on cellulose nanoparticles structure obtained from garlic and agave waste. *Carbohydrate Polymers*, 255(August).

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117347>

Homem, N. C., & Amorim, M. T. P. (2019). Synthesis of cellulose acetate using as raw material textile wastes. *Materials Today: Proceedings*, 31(xxxx), S315–S317.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.494>

Horikawa, M., Fujiki, T., Shirosaki, T., Ryu, N., Sakurai, H., Nagaoka, S., & Ihara, H. (2015). The development of a highly conductive PEDOT system by doping with partially crystalline sulfated



cellulose and its electric conductivity. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(34), 8881–8887.

<https://doi.org/10.1039/c5tc02074c>

Huda, E., Rahmi, & Khairan. (2019). Preparation and characterization of cellulose acetate from cotton.

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 364(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/364/1/012021>

Isola, M., Colucci, G., Diana, A., Sin, A., Tonani, A., & Maurino, V. (2024). Thermal properties and

decomposition products of modified cotton fibers by TGA, DSC, and Py–GC/MS. *Polymer Degradation and Stability*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110937>

Iyabode, A., Felicia, L., Okunola, A., Ajao, J., & Victor, T. (2021). Heliyon Isolation and

characterization of nanocrystalline cellulose from cocoa pod husk (CPH) biomass wastes.

Heliyon, 7(August 2020), e06680. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06680>

Jaouahar, M., Ablouh, E.-H., Hanani, Z., Jaklič, B., Spreitzer, M., Semlali, F.-Z., Ait Benhamou, A.,

Samih, Y., El Achaby, M., & Sehaqui, H. (2024). Preparation and characterization of sulfated nanocellulose: From hydrogels to highly transparent films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129464>

Kamel, S., & Khattab, T. A. (2020). Recent advances in cellulose-based biosensors for medical

diagnosis. *Biosensors*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/BIOS10060067>

Kassab, Z., Syafri, E., Tamraoui, Y., Hannache, H., Qaiss, A. E. K., & El Achaby, M. (2019).

Characteristics of sulfated and carboxylated cellulose nanocrystals extracted from *Juncus* plant stems. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1419–1425.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.023>

Kathirselvam, M., Kumaravel, A., Arthanarieswaran, V. P., & Saravanakumar, S. S. (2019). Isolation

and characterization of cellulose fibers from *Thespesia populnea* barks: A study on



physicochemical and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.044>

Kazachenko, A. S., Vasilieva, N. Y., Berezhnaya, Y. D., Fetisova, O. Y., Borovkova, V. S., Malyar, Y. N., Sudakova, I. G., Sychev, V. V., Issaoui, N., Lutoshkin, M. A., & Karacharov, A. A.

(2023). Sulfation of Birch Wood Microcrystalline Cellulose with Sulfamic Acid Using Ion-Exchange Resins as Catalysts. *Polymers*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/polym15051116>

Kouadri, I., Layachi, A., Boubendira, K., Amor, I. Ben, Hemmami, H., Zeghoud, S., Seghir, B. Ben, & Rebiai, A. (2023). A novel eco-friendly source of cellulose acetate extracted from Astragalus gombo seeds: thermal, structural, and morphological characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04568-0>

Lakra, R., Balakrishnan, M., & Basu, S. (2021). Development of cellulose acetate-chitosan-metal organic framework forward osmosis membrane for recovery of water and nutrients from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105882. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105882>

Latiffah, E., Sawitri, A., Agung, B. H., Hapidin, D. A., Edikresnha, D., Elfahmi, E., & Khairurrijal, K. (2024). Antibacterial activity of electrospun nanofibers polyvinylpyrrolidone/cellulose acetate matrix loaded by Ageratum conyzoides L. weed. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(December 2023), 100651. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100651>

López-Calderón, H. D., Avilés-Arnaut, H., Galán-Wong, L. J., Almaguer-Cantú, V., Laguna-Camacho, J. R., Calderón-Ramón, C., Escalante-Martínez, J. E., & Arévalo-Niño, K. (2020). Electrospun polyvinylpyrrolidone-gelatin and cellulose acetate bi-layer scaffold loaded with gentamicin as possible wound dressing. *Polymers*, 12(10), 1–12. <https://doi.org/10.3390/polym12102311>



- Lukanina, K. I., Grigoriev, T. E., Krashenninnikov, S. V, Mamagulashvilli, V. G., Kamyshinsky, R. A., & Chvalun, S. N. (2018). Multi-hierarchical tissue-engineering ECM-like scaffolds based on cellulose acetate with collagen and chitosan fillers. *Carbohydrate Polymers*, 191, 119–126.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.061>
- Maryana, R., Muryanto, Triwahyuni, E., Oktaviani, O., Prasetya, H., Das, A. K., & Sudiyani, Y. (2022). Extraction of Cellulose Acetate from Cajuput (*Melaleuca leucadendron*) Twigs and Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Bagasse by Environmentally Friendly Approach. *Waste and Biomass Valorization*, 13(3), 1535–1545. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01610-y>
- Morgado, D. L., & Frollini, E. (2011). Thermal decomposition of mercerized linter cellulose and its acetates obtained from a homogeneous reaction. *Polimeros*, 21(2), 111–117.
<https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000025>
- Muhitdinov, B., Heinze, T., Turaev, A., Koschella, A., & Normakhamatov, N. (2019). Homogenous synthesis of sodium cellulose sulfates with regulable low and high degree of substitutions with SO₃/Py in N,N-dimethylacetamide/LiCl. *European Polymer Journal*, 119(June), 181–188.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.07.030>
- Nabili, A., Fattoum, A., Brochier-Salon, M. C., Bras, J., & Elaloui, E. (2017). Synthesis of cellulose triacetate-I from microfibrillated date seeds cellulose (*Phoenix dactylifera* L.). *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 26(2), 137–147. <https://doi.org/10.1007/s13726-017-0505-5>
- Ochica, A., Muñoz, E., Vera, R., Gómez, E., Maciel, A., & Rivera, F. (2017). Obtention of Cellulose Acetate Nanofibers from Sugar Cane Bagasse Obtención de nanofibras de acetato de celulosa a partir. *Ciencia En Desarrollo*, 8(2), 69–77.



- Oprea, M., & Voicu, S. I. (2020). Recent advances in composites based on cellulose derivatives for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116683.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116683>
- Palaninathan, V., Raveendran, S., Rochani, A. K., Chauhan, N., Sakamoto, Y., Ukai, T., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2018). Bioactive bacterial cellulose sulfate electrospun nanofibers for tissue engineering applications. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 12(7), 1634–1645. <https://doi.org/10.1002/term.2689>
- Pinto, E., Aggrey, W. N., Boakye, P., Amenuvor, G., Sokama-Neuyam, Y. A., Fokuo, M. K., Karimaie, H., Sarkodie, K., Adenutsi, C. D., Erzuah, S., & Rockson, M. A. D. (2022). Cellulose processing from biomass and its derivatization into carboxymethylcellulose: A review. In *Scientific African* (Vol. 15). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01078>
- Pires, C., Régnier, B. M., dos Santos, M. J. R., & Alves de Freitas, R. (2023). Effect of sulfate-ester content and nanocellulose allomorph on stability of amylopectin-xyloglucan water-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 141, 108700.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108700>
- Qin, Z., Ji, L., Yin, X., Zhu, L., Lin, Q., & Qin, J. (2014). Synthesis and characterization of bacterial cellulose sulfates using a SO₃/pyridine complex in DMAc/LiCl. *Carbohydrate Polymers*, 101(1), 947–953. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.068>
- Rajeswari, A., Christy, E. J. S., Swathi, E., & Pius, A. (2020). Fabrication of improved cellulose acetate-based biodegradable films for food packaging applications. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.07.003>



- Ribeiro, A. M., Magalhães, M., Veiga, F., & Figueiras, A. (2019). *Cellulose-Based Hydrogels in Topical Drug Delivery: A Challenge in Medical Devices*. December, 1205–1233.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_41
- Ribeiro, S. D., Meneguín, A. B., Barud, H. da S., Silva, J. M., Oliveira, R. L., Asunção, R. M. N. de, Tormin, T. F., Muñoz, R. A. A., Filho, G. R., & Ribeiro, C. A. (2021). Synthesis and characterization of cellulose acetate from cellophane industry residues. Application as acetaminophen controlled-release membranes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
<https://doi.org/10.1007/s10973-021-11022-8>
- (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, P. y A. (2018). *(Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación)*. Centro de Información Agropecuaria y Pesquera Estadísticas de La Producción Agrícola En México.
http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx /Avance Nacional Cultivo.do
- Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., & Conrad, C. M. (1959). An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10), 786–794. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>
- Sezali, N. A. A., Ong, H. L., Mohd Pisal, M. H., Jullok, N., Manzano, M. C., Villagrancia, A. R., & Doong, R. (2023). *Preparation and Characterization of Cellulose Acetate from Rice Straw BT - Emerging Technologies for Future Sustainability* (H. Shukor, H. N. A. Halim, H. L. Ong, B.-B. Lee, & M. H. M. Pisal, Eds.; pp. 429–436). Springer Nature Singapore.
- Shaikh, H. M., Anis, A., Poulouse, A. M., Al-Zahrani, S. M., Madhar, N. A., Alhamidi, A., Aldeligan, S. H., & Alsubaie, F. S. (2022). Synthesis and Characterization of Cellulose Triacetate Obtained from Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Trunk Mesh-Derived Cellulose. *Molecules*, 27(4).
<https://doi.org/10.3390/molecules27041434>



- Sirviö, J. A., Ukkola, J., & Liimatainen, H. (2019). Direct sulfation of cellulose fibers using a reactive deep eutectic solvent to produce highly charged cellulose nanofibers. *Cellulose*, 26(4), 2303–2316. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02257-8>
- Sodeinde, K. O., Ojo, A. M., Olusanya, S. O., Ayanda, O. S., Adeoye, A. O., Dada, T. M., & Lawal, S. (2020). Cellulose isolated from Delonixregia pods : Characterisation and application in the encapsulation of vitamin A. *Industrial Crops & Products*, November, 113138. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113138>
- Song, W., Zeng, Q., Yin, X., Zhu, L., Gong, T., & Pan, C. (2018). Preparation and anticoagulant properties of heparin-like electrospun membranes from carboxymethyl chitosan and bacterial cellulose sulfate. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1396–1405. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.133>
- Strätz, J., Liedmann, A., Heinze, T., Fischer, S., & Groth, T. (2020). Effect of Sulfation Route and Subsequent Oxidation on Derivatization Degree and Biocompatibility of Cellulose Sulfates. *Macromolecular Bioscience*, 20(2). <https://doi.org/10.1002/mabi.201900403>
- Tarchoun, A. F., Trache, D., & Klapötke, T. M. (2019). Microcrystalline cellulose from Posidonia oceanica brown algae: Extraction and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 837–845. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.176>
- Tedeschi, G., Guzman-puyol, S., Paul, U. C., Barthel, M. J., Goldoni, L., Caputo, G., Ceseracciu, L., Athanassiou, A., & Heredia-guerrero, J. A. (2018). Thermoplastic Cellulose Acetate Oleate Films with High Barrier Properties and Ductile Behaviour Materials Characterization Facility , Istituto Italiano di Tecnologia , Via Morego 30 , Genova ,. *Chemical Engineering Journal*, 348, 840–849. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.031>



- Tiwari, S., Patil, R., & Bahadur, P. (2019). Polysaccharide based scaffolds for soft tissue engineering applications. *Polymers*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/polym11010001>
- Torlopov, M. A., Shevchenko, O. G., Chukicheva, I. Y., & Udoratina, E. V. (2020). Effective, low cytotoxic cell membranes protector based on amphiphilic conjugate of cellulose sulfate with isobornylphenol. *Reactive and Functional Polymers*, 156, 104740. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104740>
- Worku, L. A., Bachheti, R. K., & Tadesse, M. G. (2022). Isolation and Characterization of Natural Cellulose from *Oxytenanthera abyssinica* (Lowland Ethiopian Bamboo) Using Alkali Peroxide Bleaching Stages Followed by Aqueous Chlorite in Buffer Solution. *International Journal of Polymer Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5155552>
- Xu, L., Liu, Y., Hu, Z., & Yu, J. C. (2021). Converting cellulose waste into a high-efficiency photocatalyst for Cr(VI) reduction via molecular oxygen activation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120253>
- Zeng, K., Xu, D., Gong, S., Lu, Y. T., Vana, P., Groth, T., & Zhang, K. (2023). Thermoresponsive hydrogels with sulfated polysaccharide-derived copolymers: the effect of carbohydrate backbones on the responsive and mechanical properties. *Cellulose*, 30(13), 8355–8368. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05373-8>



Control de la calidad como herramienta para evaluar biofertilizantes rizobianos en la Agricultura Sustentable del Chile en Chiapas, México

Rincón-Molina, Clara Ivette¹(0000-0003-2156-9549), Manzano-Gómez, Luis Alberto¹(0000-0002-6680-471X), Rincón-Rosales Reiner¹(0000-0001-8141-2610), Rincón-Molina, Francisco Alexander^{1*}(0000-0001-6997-4872)

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

*Autor para correspondencia: francisco.rm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

Se aplicó control estadístico de calidad para evaluar la eficiencia de biofertilizantes rizobianos en el cultivo sustentable de chile (*Capsicum chinense*) en Chiapas, México. Se analizaron parámetros fisicoquímicos del suelo y la diversidad bacteriana mediante metagenómica estructural. Las plantas inoculadas con PGPB mostraron mayor crecimiento y producción. El análisis causa-efecto indicó que la eficacia dependió de la fertilidad del suelo, el manejo agronómico y la diversidad microbiana. Se identificaron limitantes como variabilidad climática y control deficiente de plagas. Los resultados confirman que el control de calidad permite evaluar con precisión el impacto de biofertilizantes en sistemas agrícolas sustentables.

Palabras clave: *Capsicum chinense*, control de calidad, microbiota del suelo, rizobacterias

INTRODUCCION

El control estadístico de calidad (CEC) es una herramienta fundamental para optimizar procesos agrícolas, estabilizar rendimientos y respaldar la toma de decisiones con base en datos. Su aplicación permite analizar la variabilidad, identificar ineficiencias y mejorar de forma continua la gestión de recursos e insumos (Silva et al., 2020). Entre las técnicas más empleadas destacan los diagramas causa-efecto, el análisis de varianza y las cartas de control, útiles para monitorear procesos y corregir desviaciones críticas (Nagar & Gahlot, 2022).

En México, la agricultura convencional depende del uso intensivo de fertilizantes químicos para mantener la producción, práctica que ha deteriorado la fertilidad del suelo, afectado el medio ambiente y puesto en riesgo la salud humana. Frente a esta situación, los biofertilizantes se presentan como una alternativa sustentable, al estar compuestos por microorganismos que promueven el crecimiento vegetal y mejoran las propiedades del suelo (Sura, 2024). Entre ellos, las bacterias del género *Rhizobium* destacan por

su capacidad de fijar nitrógeno, solubilizar fósforo y producir reguladores del crecimiento, contribuyendo así a la nutrición vegetal (Vessey, 2003).

Aunque se ha documentado su efectividad en cultivos básicos, su uso en especies hortícolas como el chile (*Capsicum chinense*) sigue siendo poco explorado, particularmente en regiones con alto potencial productivo como Chiapas (Rincón-Molina et al., 2020). El chile es un cultivo estratégico en México por su valor económico, cultural y alimentario. En Chiapas, *C. chinense* representa una opción viable para pequeños productores, quienes enfrentan retos como bajos rendimientos y dependencia de agroquímicos. La integración de biofertilizantes rizobianos con herramientas de CEC constituye una estrategia innovadora y sustentable para mejorar la producción de chile. Este estudio evaluó dicha integración, con el propósito de fortalecer la agricultura local mediante evidencia técnica y prácticas respetuosas con el medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el sitio de producción “Santa Rosa”, ubicado en el municipio de Berriozábal, Chiapas (16°43'23.0"LN, 93°16'42.6"LO; altitud: 1,046 msnm), sobre suelos tipo Leptosoles (Figura 1). En una parcela experimental de 2,100 m², se recolectaron muestras de suelo rizosférico de cinco puntos al azar, a 20 cm de profundidad. Las muestras se homogenizaron para obtener una muestra representativa para el análisis fisicoquímico y metagenómico.

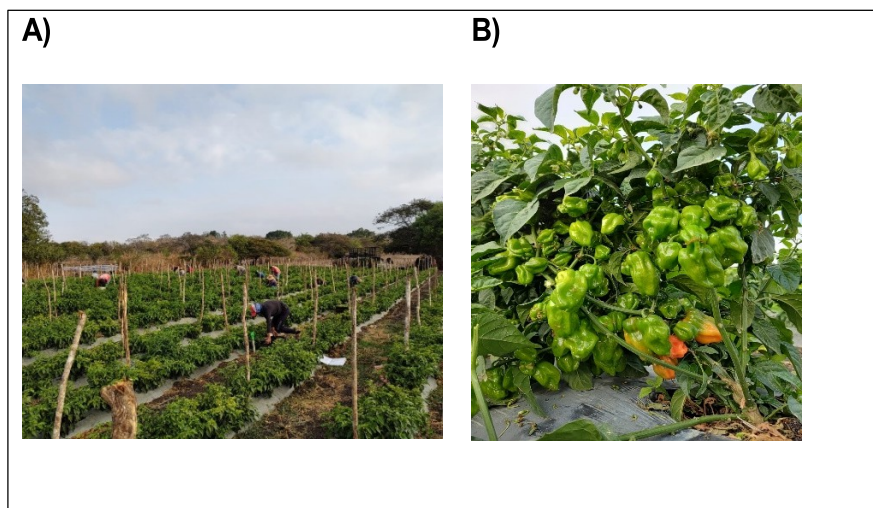


Figura 1. Sitio experimental del cultivo de chile. A) Distribución espacial del cultivo. B) Plantas de chile con fructificación de *C. chinense*. Fotos: Luis Alberto Manzano-Gómez.

Se evaluaron pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), nitrógeno y carbono total mediante un analizador FLASH 2000®, y fósforo total por digestión HNO₃/HClO₄ (Rincón-Molina et al., 2020). Se utilizó la cepa *Sinorhizobium mexicanum* ITTG-R7^T. Las plantas de chile (45 días de edad, uniformes en vigor) fueron distribuidas en un diseño completamente al azar con seis repeticiones y cuatro tratamientos, incluyendo inoculación simple, combinada con fertilizante, control químico, y control negativo. La inoculación fue de 100 mL a una concentración de 10⁶ UFC mL⁻¹. Se midieron altura de planta (cm), grosor de tallo (mm), Peso seco de planta (g) y Clorofila (SPAD). Así también, fue determinado: Frutos por planta, Longitud del fruto (cm), ancho del fruto (mm), peso del fruto (g) y volumen estimado del



fruto (cm³). Los datos se analizaron por ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0.05$), y se aplicaron herramientas de control de calidad como límites de control y diagramas causa-efecto (Gutiérrez & De la Vara, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo agrícola presentó pH alcalino, conductividad eléctrica moderada, buena capacidad de intercambio catiónico, contenido medio de nitrógeno, carbono total adecuado, fósforo ligeramente bajo y una relación C/N equilibrada, condiciones consideradas favorables para el cultivo de chile.

En el análisis de la comunidad bacteriana del suelo rizosférico, la secuenciación del gen 16S rRNA reveló una alta diversidad microbiana, con predominio del filo Actinobacteria, seguido por Proteobacteria, Acidobacteria y Firmicutes. La familia Bacillaceae fue la más abundante, y se identificaron géneros como *Bacillus*, reconocidos por su capacidad para producir auxinas y otros compuestos promotores del crecimiento vegetal, lo que resalta su potencial como bacterias benéficas (Rincón-Molina et al., 2020).

Las plantas de chile inoculadas con *S. mexicanum* ITTG-R7^T y *S. chiapasense* ITTG-S70^T mostraron mejores resultados en altura, grosor del tallo, biomasa y contenido de clorofila en comparación con el fertilizante químico y el control (Tabla 1). *S. mexicanum* destacó por su efecto en el crecimiento, mientras que *S. chiapasense* incrementó significativamente el contenido de clorofila. Estos efectos se atribuyen a la fijación biológica de nitrógeno y la producción de fitohormonas. La biofertilización con rizobios nativos se perfila como una estrategia sustentable y eficaz para mejorar el desarrollo del chile y reducir el uso de agroquímicos.

Tabla 1. Efecto de la inoculación bacteriana y fertilización sobre variables de crecimiento en plantas de chile (*Capsicum chinense*).

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Grosor del tallo (mm)	Peso seco de planta (g)	Clorofila (SPAD)
T1: No inoculado	58.7 ± (2.95) B	9.4 ± (1.25) C	185.3 ± (47.1) B	36.2 ± (3.18) D
T2: Fertilizante químico	61.2 ± (3.87) AB	10.8 ± (2.02) B	201.7 ± (55.9) AB	38.5 ± (2.47) C
T3: <i>S. mexicanum</i> ITTG-R7	65.4 ± (2.11) A	13.1 ± (2.74) A	246.0 ± (18.6) A	40.7 ± (2.21) B
T4: <i>S. chiapasense</i> ITTG-S70	62.5 ± (4.62) AB	12.6 ± (3.01) A	199.2 ± (20.3) B	43.0 ± (1.89) A
valor <i>p</i>	0.0045	0.0001	0.0063	0.0000
HSD† ($p < 0.05$)	5.82	1.12	52.30	1.24



Las cepas rizobianas ITTG-R7^T y ITTG-S70^T mejoraron significativamente el rendimiento del chile en número, peso y volumen de frutos (Tabla 2). Estos efectos se atribuyen a su capacidad para fijar nitrógeno y estimular fitohormonas. Los resultados respaldan su uso como alternativa sustentable al fertilizante químico, promoviendo una producción eficiente y ambientalmente responsable.

Tabla 2. Tamaño de fruto y rendimiento estimado en chile (*Capsicum chinense*) inoculado con cepas rizobianas nativas.

Tratamiento	Frutos por planta	Altura del fruto (cm)	Ancho del fruto (mm)	Peso del fruto (g)	Volumen estimado del fruto (cm ³)
T1: No inoculado	15.61 ± (7.24) B	5.43 ± (0.39) B	2.65 ± (0.28) C	6.5 ± (1.3) D	6.9 ± (1.6) C
T2: Fertilizante	22.23 ± (5.84) A	5.89 ± (0.42) A	3.22 ± (0.32) A	8.4 ± (2.0) A	8.9 ± (2.1) A
T3: ITTG-R7	21.91 ± (5.92) A	5.87 ± (0.40) A	3.05 ± (0.29) B	7.5 ± (1.8) B	8.1 ± (1.7) B
T4: ITTG-S70	21.18 ± (3.81) A	5.52 ± (0.39) B	3.04 ± (0.26) B	6.9 ± (1.5) C	7.8 ± (1.6) B
valor -p	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
HSD† ($p < 0.05$)	1.9405	0.278	0.323	1.32	1.24

En relación con la aplicación del análisis de control de calidad en el sistema de producción agrícola de chile (*Capsicum chinense*), se establecieron límites de control para las variables morfológicas y de rendimiento en plantas inoculadas con *S. mexicanum* ITTG-R7^T. Los resultados mostraron que el 82 % de las plantas evaluadas se mantuvieron dentro del límite central (LC) en la variable de altura total, mientras que el grosor del tallo alcanzó un 85 % dentro del LC. Para el peso seco de planta y el índice SPAD de clorofila, se registraron porcentajes de conformidad del 84 % y 86 %, respectivamente, lo que indica una alta estabilidad en el desarrollo vegetativo. En cuanto a las variables productivas, el número de frutos por planta se mantuvo dentro del LC en un 87 % de los casos. La longitud y el ancho del fruto presentaron valores dentro del rango esperado en un 81 % y 83 %, respectivamente. El peso y el volumen estimado del fruto mostraron niveles de control del 85 % y 86 %, lo que sugiere una uniformidad favorable en la producción.

Adicionalmente, se aplicó un diagrama de causa-efecto que permitió identificar factores críticos que influyen en el rendimiento, tales como la fertilidad del suelo, el manejo agronómico y la calidad de la inoculación (Gutiérrez & De la Vara, 2013). Estos resultados respaldan el uso de herramientas estadísticas como estrategia eficaz para monitorear y mejorar la eficiencia de la biofertilización en el cultivo de chile.



CONCLUSIONES

La biofertilización rizobiana constituye una estrategia biotecnológica eficaz para fortalecer sistemas agrícolas sustentables, al incrementar la productividad vegetal y mejorar la salud del suelo. *Sinorhizobium mexicanum* ITTG-R7^T demostró un alto potencial como bacteria promotora del crecimiento vegetal (PGPB) en el cultivo de chile. Asimismo, la aplicación de herramientas estadísticas y de control de calidad permitió identificar factores críticos que influyen en la eficiencia del sistema productivo, facilitando la toma de decisiones informadas. Esta integración técnica impulsa procesos más eficientes, sostenibles y adaptados a las necesidades reales del sector agrícola.

AGRADECIMIENTOS

A Tecnológico Nacional de México por los apoyos otorgados en los proyectos 21914.25-P y 22004.25-P.

REFERENCIAS

- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2013). Control estadístico de la calidad y Seis Sigma (2.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Nagar, H., & Gahlot, A. (2022). A review on statistical quality control. *NeuroQuantology*, 20(9), 637–642. <https://doi.org/10.14704/nq.2022.20.9.NQ440070>
- Rincón-Molina, C. I., Martínez-Romero, E., Ruiz-Valdiviezo, V. M., Velázquez, E., Ruiz-Lau, N., Rogel-Hernández, M. A., ... Rincón-Rosales, R. (2020). Plant growth-promoting potential of bacteria associated to pioneer plants from an active volcanic site of Chiapas (Mexico). *Applied Soil Ecology*, 146, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103390>
- Silva, R. P., Santos, A. F., Oliveira, B. R., Souza, J. B. C., Oliveira, D. T., & Carneiro, F. (2020). Potential of using statistical quality control in agriculture 4.0. *Revista Ciência Agronômica*, 51(4), e20200105. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200105>
- Sura, S. P. (2024). Sustainable agriculture: Enhancing soil health and crop yields with biofertilizers. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(1), 2245–2248. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.1.1001>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>



Tecnologías físicas aplicadas a semillas de cacahuete

Santos-Espinoza, Ana Martin¹(0000-0003-0645-847X), Luján-Hidalgo, María Celina¹(0000-0002-5720-9652), Abud-Archila, Miguel¹(0000-0002-4509-7964), Camas-Anzueto, Jorge Luis¹(0000-0002-0379-7073), Gutiérrez-Miceli, Federico Antonio^{1*}(0000-0002-5379-1518)

¹ División de Posgrado, Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla-Gutiérrez, Carretera Panamericana km 1080, Tuxtla Gutiérrez 29050, Chiapas, México; (S.E.A.M.), (L.H.M.C.), (A.A.M.), (C.A.J.L.), (G.M.F.A.).

* Autor por correspondencia: federico.gm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

La bioestimulación de semillas se ha estado practicando como una herramienta prometedora para mejorar la germinación y el crecimiento de las plántulas, pero todavía hay ambigüedad con respecto a las perspectivas de diferentes tecnologías físicas y sus posibles efectos en las semillas oleaginosas. El presente estudio evaluó el potencial de la aplicación de tecnologías físicas en semillas para mejorar la germinación y el crecimiento del cacahuete. Se realizaron pruebas de germinación, velocidad de germinación y pruebas de viabilidad a nivel invernadero. Las semillas de cacahuete variedad criolla se expusieron directamente a radiación UV-C (30 minutos), láser (15 minutos) y campo magnético (60 minutos), además, se utilizaron semillas no expuestas como control. Las semillas de cada tratamiento físico se sembraron en condiciones normales. Cada tratamiento se replicó tres veces, utilizando una unidad experimental conformada de 25 semillas. Los resultados muestran que las tecnologías físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético aplicadas a semillas de cacahuete aumentaron significativamente el porcentaje de germinación con respecto al control, este aumento correspondió a 9 %, 19 % y 15.67 % respectivamente, siendo la tecnología láser la más adecuada para mejorar la germinación en cacahuete. Se comprobó que la tecnología láser aplicada a semillas genera un efecto térmico que favorece mayormente la germinación adicionalmente al estímulo fisiológico que genera el tratamiento. Finalmente, las pruebas de viabilidad demostraron que la aplicación de tecnologías físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético no provocaron cambios morfológicos y/o daños en el embrión que pueden causar la pérdida de viabilidad.

Palabras clave: bioestimulación de semillas, germinación, viabilidad.

INTRODUCCION

El cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) es una oleaginosa originaria de América del Sur que llegó a México durante la época prehispánica y posteriormente se expandió a todo el mundo. Las semillas de cacahuete son apreciadas por su sabor y valor nutricional, empleándose en una gran variedad de productos debido al alto contenido de proteínas, grasas, carbohidratos, fibras, compuestos bioactivos como flavonoides, fenoles totales, resveratrol y ácido fólico (Zhao et al. 2012). Estos compuestos bioactivos poseen propiedades



antioxidantes con beneficios para la salud, que contribuyen a la reducción del riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, Alzheimer y a retrasar el envejecimiento (Limmongkon et al. 2017).

En 2024, México produjo 70,228.35 toneladas de cacahuete, cosechadas en 40,070.52 hectáreas, y son los estados de Chihuahua, Chiapas y Puebla los principales productores, con un aporte de 54 por ciento de la producción nacional (DGSIA, 2024). La producción de cacahuete se enfrenta a diversos problemas de diferente índole, entre ellos, altos costos de producción, poca o nula organización para la comercialización, mal manejo de enfermedades, plagas y malezas y condiciones climáticas cambiantes (Gu, 2025), esto hace que cada día este cultivo sea menos atractivo para los productores debido a que estos factores traen como consecuencia disminución del rendimiento y deficiencias nutricionales del cacahuete. En este contexto, se ha implementado el uso de tecnologías físicas aplicada a semillas con el objetivo de aumentar la producción de plantas y mejorar su contenido nutricional, los métodos físicos más prometedores son el cebado de semillas con campo magnético, irradiación con microondas, láser, radiación UV-C, rayos gamma, ultrasonido, entre otros (Araújo et al. 2016). Estas tecnologías físicas ofrecen ventajas sobre los tratamientos convencionales basados en sustancias químicas, en primer lugar, disminución del uso de fertilizantes y agroquímicos reduciendo la contaminación del suelo. Otra ventaja es que los métodos físicos también se pueden utilizar para la desinfección de semillas antes de la siembra, produciendo mayor resistencia a enfermedades o patógenos del cultivo, así mismo, se ha reportado que la aplicación de técnicas físicas en semillas mejora la tolerancia al estrés ambiental (Govindaraj et al. 2017).

La radiación ultravioleta C (UV-C) es una radiación de longitud de onda corta, que va de 100 a 280 nm, por lo tanto, es la porción de mayor energía dentro del espectro de radiación ultravioleta (UV). Esta radiación no se encuentra de forma natural en la biosfera, al interactuar con tejidos vegetales, la radiación UV-C causa daño por ionización y dimerización de pirimidinas en las moléculas de ADN (Nawkar et al. 2013), sin embargo, es posible tener un efecto beneficioso de la aplicación subletal de un agente que induce estrés físico o químico (Luckey, 1980). Se ha reportado que la radiación UV-C aplicado a semillas induce a la acumulación de compuestos asociados al estrés, flavonoides, fenoles y fitoalexinas (Kamel et al. 2022).

La tecnología láser es un dispositivo que genera una radiación electromagnética con propiedades que ninguna otra fuente de luz puede generar. La radiación láser emite un haz de luz, lo que garantiza que la luz sea monocromática y direccional. Estas dos características hacen que la luz láser sea altamente estructurada en el espacio y correlacionada en el tiempo; por lo que también es denominada luz coherente (Jelínková & Šulc, 2013). La radiación láser se puede utilizar en la agricultura para mejorar la productividad agrícola, Los estudios han demostrado que la aplicación de láser en semillas puede mejorar la germinación y el crecimiento general de las plántulas, además la aplicación de láser en plantas puede inhibir el crecimiento de malezas como una alternativa a los herbicidas químicos para el control de malezas y el manejo de plagas (Gutiérrez-Miceli et al. 2024).

Por otro lado, el campo magnético terrestre afecta a todos los seres vivos, la fuerza del campo magnético en la superficie de la tierra varía, y es aproximadamente 30 μT en un área que incluye la mayor parte de América del Sur (Maffei, 2014). Los campos electromagnéticos artificiales generados por el hombre son superiores al de la superficie de la tierra, y se han empleado sobre sistemas biológicos, Dichos efectos dependen de muchos factores, entre ellos: intensidad de los campos, tipo de onda, tiempo de exposición y tipo de célula (Sarraf et al. 2020).

De manera general, la base de cualquier tratamiento físico reside en elegir a la semilla adecuada, no todas las semillas son aptas para todos los tratamientos; por lo tanto, comprender el perfil de resistencia y la salud general de la semilla puede determinar su compatibilidad con tratamientos específicos. El uso de semillas

de alta calidad, libres de defectos y contaminantes, también es esencial para lograr los resultados deseados. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar diferentes técnicas físicas aplicadas a semillas de cacahuete.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de material vegetal

Las semillas de cacahuete variedad criolla utilizadas para este estudio fueron recolectadas en la localidad de Suchiapa, Chiapas, México ($16^{\circ}38'10.8''$ N $93^{\circ}07'16.4''$ W). La selección de semillas consistió en eliminar aquellas que presentaban imperfecciones, heridas, deformación parcial o total y/o una coloración irregular. Las semillas seleccionadas presentaron un tamaño promedio de diámetro ecuatorial de 10 mm y largo de 21.2 mm (Figura 1).



Figura 1. Semillas de cacahuete variedad criolla (*Arachis hypogaea* L.) seleccionadas para este estudio.

Posteriormente, se realizaron pruebas preliminares para determinar los tiempos de exposición adecuados para cada técnica física empleada en esta investigación. Los experimentos se realizaron en el Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez (TecNM), en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales (LCTV).

Método de aplicación de radiación UV-C

Antes de aplicar radiación UV-C a semillas, se encendió la lámpara durante 5 minutos. Se midió la intensidad de la radiación UV-C en diferentes zonas de la cámara de irradiación con un radiómetro (UV-C 254 de Lutron). Los valores de intensidad constante y máxima se detectaron en la zona central. En la parte central de la cámara se colocaron las semillas del tratamiento, asegurando que las semillas recibieran la misma intensidad de luz UV-C (2.5 W m^{-2}). Además, se utilizaron semillas de cacahuete no irradiadas como control. La dosis que corresponde al tiempo de 30 minutos se aplicó a semillas colocadas bajo una lámpara UV-C de 15 W (Philips TUV 15WG15T8) a una distancia de 30 cm. La lámpara se caracterizó obteniéndose una longitud de onda central de emisión de 253.1 nm (Figura 2). Inmediatamente después de la exposición se midió la temperatura superficial de las semillas control y tratamiento UV-C antes de ser sembradas con la ayuda de una cámara termográfica infrarroja marca UNI-T.

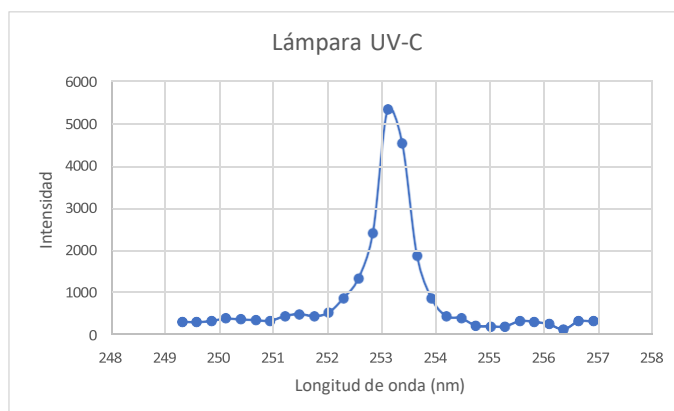


Figura 2. Espectro de la fuente de luz ultravioleta, lámpara tubular marca Philips (TUV 15WG15T8).

Método de aplicación de radiación láser

Se empleo una barra motorizada de láser rojo de la marca Steelpro® tipo diodo de 120 mW a una distancia de 15 cm del haz a la semilla y una dosis que corresponde al tiempo de 15 minutos según la metodología descrita y adaptada de Ruiz-Morales et al. (2025). En cada haz de luz láser se colocó una semilla, como control se utilizaron semillas no irradiadas. La luz láser que emite el equipo se caracterizó obteniéndose una longitud de onda central de emisión de 636 nm (Figura 3). Finalmente, se midió la temperatura superficial de las semillas control y tratamiento láser antes de ser sembradas con la ayuda de una cámara termográfica infrarroja marca UNI-T.

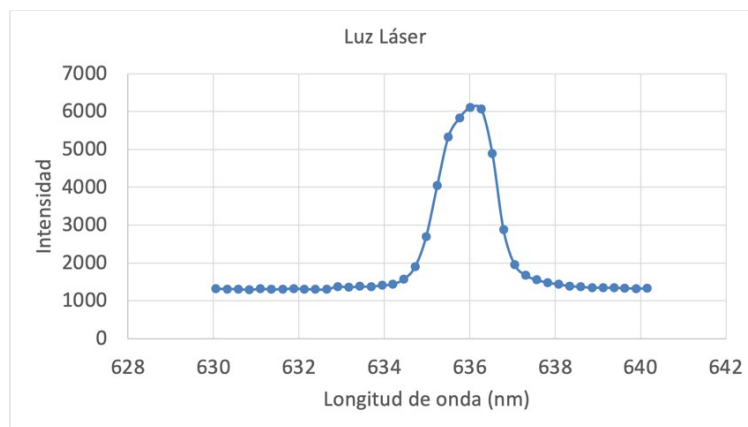


Figura 3. Espectro de la fuente de luz láser tipo diodo de la marca Steelpro®

Método de aplicación de campo magnético

Se generó un campo magnético con un imán dipolar toroidal magnetizado a través de su espesor colocado en una estructura de plástico, posicionados con la polaridad norte en la cara superior de la placa. En la parte



inferior posee dos bobinas iguales y coaxiales donde se hace circular una corriente eléctrica. La intensidad promedio del campo magnético estático generado fue de 100 mT. Se colocaron 10 semillas durante 60 minutos de exposición al campo magnético estático. Las semillas fueron magnéticamente tratadas antes de entrar en contacto con el agua. Como control, se utilizaron semillas no expuestas. Se midió la temperatura superficial de las semillas control y tratamiento campo magnético antes de ser sembradas con la ayuda de una cámara termográfica infrarroja marca UNI-T.

Condiciones de siembra y análisis estadístico

Las semillas de cada tratamiento físico se sembraron a nivel invernadero. Cada tratamiento se replicó tres veces, utilizando una unidad experimental conformada de 25 semillas. Se realizó un ANOVA simple a las variables evaluadas; aquellas que presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) se les aplicó la prueba de Tukey para evaluar la diferencia de medias entre tratamientos. El análisis de datos se realizó con el programa Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que las tecnologías físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético aplicadas a semillas de cacahuete antes de la siembra aumentaron significativamente el porcentaje de germinación con respecto al control en condiciones de invernadero (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de germinación de cacahuete durante 10 días después de la siembra posterior a la aplicación de las tecnologías físicas.

Tratamientos	% de germinación
Control	79.33 % $\pm$ 3.05 ^c
UV-C	88.33 % $\pm$ 0.57 ^b
Láser	98.33 % $\pm$ 1.57 ^a
Campo magnético	95.00 % $\pm$ 5.0 ^{ab}
Tukey HSD ($P \leq 0.05$)	7.94

Los datos con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). Media $\pm$ error estándar.

Las semillas tratadas con láser presentaron los porcentajes significativos más altos con respecto al control, este aumento corresponde a un 19% para el tratamiento láser, seguido del tratamiento con campo magnético con un aumento del 15.67%.

El efecto bioestimulante de las técnicas físicas evaluadas sobre la germinación ha sido previamente reportado, Neelamegam & Sutha (2015) reportaron que el tratamiento con radiación UV-C en semillas de cacahuete promovió generalmente su germinación, siendo el tratamiento de 60 minutos el que incrementó el efecto promotor de la germinación en comparación con el control de semillas secas y remojadas en agua.

En contraste con este trabajo, podemos observar que el estímulo de la germinación se evidenció en menos tiempo de exposición de las semillas a radiación UV-C, por lo que este efecto podría deberse a la variedad empleada de cacahuete, probablemente distintas variedades dentro de una misma especie respondan de manera diferente a radiación, debido a variaciones en engrosamiento del tegumento, contenido antioxidante o sensibilidad al estrés oxidativo.



Korpetis et al. (2023) mencionan que las variedades criollas evolucionan en ambientes específicos, desarrollando tolerancia a condiciones adversas mientras las variedades comerciales se seleccionan para máximos rendimientos en condiciones óptimas.

Por otro lado, Ruíz-Morales et al. (2025) reportaron que la aplicación de radiación láser a semillas de cacahuete aumentó significativamente el porcentaje de germinación de semillas sembradas en condiciones no controladas (nivel campo). Esto nos indica que estas tecnologías físicas tienen robustez del estímulo ante condiciones ambientales. El efecto de la bioestimulación es suficientemente robusto para superar la variación de temperatura, humedad, viento, durante las primeras fases del desarrollo. Sin embargo, la intensidad del efecto puede reducirse si las condiciones de campo son extremadamente adversas (sequía severa, compactación del suelo, heladas), las cuales podrían anular el estímulo inicial de las etapas tempranas.

Respecto al tratamiento con campo magnético, este es el primer reporte del efecto del campo magnético sobre la germinación del cacahuete; sin embargo, en otros cultivos, como en maracuyá (*Passiflora edulis*) la exposición a campo magnético (200 mT) estimuló la germinación de las semillas, la emergencia y el vigor de las plántulas (Menegatti et al. 2019). También, Florez et al. (2019) reportaron en *Oryza sativa* L. en un rango de exposición de 125–250 mT un incremento en la germinación, esta investigación observó que la exposición a campos magnéticos de diferentes duraciones e intensidades exhibían raíces más largas y pesadas en comparación con las plántulas control (no tratadas), además de que generaron un aumento de raíces secundarias con mayor desarrollo en las plantas tratadas.

En general, la germinación de semillas también se ve afectada por diversos factores, tanto bióticos como abióticos, el contenido de agua imbibida de una semilla, la velocidad de hidratación, temperatura, luz, oxígeno, dióxido de carbono, la presencia de diversos patógenos, son alguno de estos factores (Lamichhane et al. 2018), por lo tanto, la sinergia de estos factores con los eventos simultáneos producidos por la aplicación de las tecnologías físicas en las semillas, pueden generar condiciones óptimas que favorezcan el proceso de germinación.

Específicamente se ha reportado que la aplicación de la tecnología láser en semillas puede generar una acción térmica, provocando un calentamiento de las células o moléculas que eficientemente absorban la luz a esa longitud de onda. Esa energía, en consecuencia, es convertida en calor, lo que podría estar causando aumentos en las actividades enzimáticas del proceso de germinación y acelerar los procesos metabólicos para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Hernández-Aguilar et al. 2016).

Por lo anterior, es relevante conocer los cambios de temperatura en las semillas expuestas a las tecnologías físicas debido a que el efecto térmico podría tener una importancia sustancial en las mejoras de los procesos fisiológicos y bioquímicos que ocurren en el proceso de germinación y en las etapas posteriores de crecimiento vegetal. En la Tabla 2 se observan los resultados de la temperatura superficial promedio de las semillas de cacahuete tras la aplicación de las tecnologías físicas.

Tabla 2. Temperatura superficial de semillas no expuestas (Control) y semillas tratadas con las tecnologías físicas evaluadas.

Tratamientos	Temperatura (°C)
Control	28.3 ± 1.15^b
UV-C	29 ± 1.01^b
Láser	34.66 ± 1.52^a
Campo magnético	27.3 ± 1.52^b
Tukey HSD ($P \leq 0.05$)	3.45

Los datos con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). Media $\pm$ error estándar.

Los resultados muestran que existió una variación promedio de la temperatura superficial de las semillas, producida por la exposición de 15 minutos a radiación láser; este aumento significativo corresponde a 6.36 grados Celsius con respecto a las semillas control. Las semillas de cacahuate expuestas a las técnicas de radiación UV-C y campo magnético no presentaron diferencias significativas de temperatura con respecto al control.

Por otro lado, la viabilidad de los embriones vegetales es crucial para la reproducción y perpetuación de las plantas, ya que determina su capacidad para germinar y contiene estructuras básicas para iniciar el crecimiento, en este estudio es relevante conocer cambios morfológicos y/o daños en el embrión que pueden causar la pérdida de viabilidad por el uso de las tecnologías físicas (Figura 4).

Los resultados muestran que la aplicación de tecnologías físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético no provocaron daños en el embrión que pueden causar la pérdida de viabilidad. Por el contrario, se puede observar que la tinción rosa oscura obtenida en los embriones tras la aplicación de las tecnologías físicas evaluadas es mayor en comparación con los embriones de las semillas control. Es importante mencionar que tras la aplicación de las tecnologías físicas no se registraron embriones no viables.

La viabilidad embrionaria es importante en diversos contextos, principalmente en la mejora genética y la producción de los cultivos (Mancipe-Murillo et al. 2018).

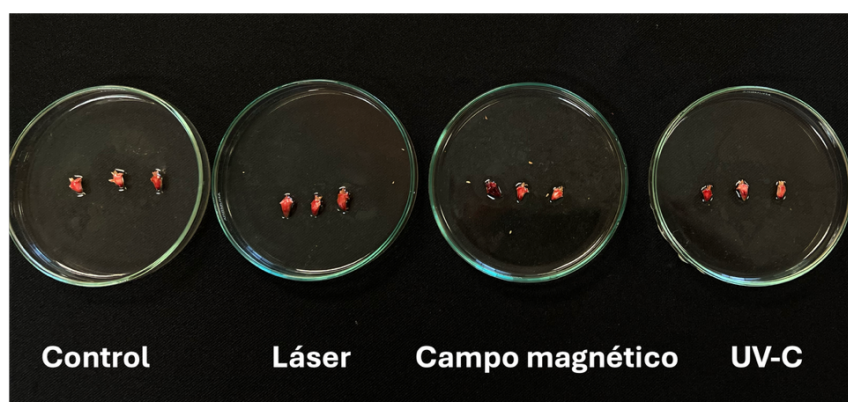


Figura 4. Resultados de la prueba de viabilidad con Tetrazolio en embriones de cacahuate tratados con las tecnologías físicas.



En la Tabla 3 se observan los resultados del índice de velocidad de germinación (IVG), estos resultados muestran que las tecnologías láser y campo magnético aplicadas a las semillas de cacahuete incrementaron significativamente la velocidad de germinación.

Tabla 3. Índice de velocidad de germinación de semillas tratadas con tecnologías físicas como tratamiento antes de la siembra.

Tratamientos	IVG (Plantas/días)
Control	2.0 ± 0.1^b
UV-C	2.23 ± 0.05^{ab}
Láser	2.46 ± 0.05^a
Campo magnético	2.36 ± 0.15^a
Tukey HSD ($P \leq 0.05$)	0.26

IVG= índice de velocidad de germinación. Los datos con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). Media $\pm$ error estándar.

El incremento de la velocidad de germinación en semillas tratadas con radiación UV-C, láser y campo magnético ha sido previamente reportada en cultivos ricos en almidón, Pouria Sadeghianfar et al. (2019) mostraron que la exposición de semillas de maíz y remolacha azucarera a radiación UV-C (254 nm) no alteró significativamente el porcentaje de germinación, pero sí aumentó la velocidad de germinación, con radículas y plúmulas más largas en los tratamientos de 8 h y 12 h, respectivamente.

Por lo anterior, el tratamiento con radiación UV-C de estas semillas sugiere mecanismos como la ruptura del tegumento o el leve aumento de temperatura inducidos por la radiación. Por otro lado, Hasan et al. (2021) reportaron que el tratamiento láser en maíz mejoró la calidad de semillas, aumentando el contenido de proteínas y almidón. Atribuyendo los efectos a un aumento de energía interna que facilita la actividad enzimática y la división celular, por lo que el tratamiento láser sugiere mecanismos que incluyen activación de fitocromos, estimulación de hormonas (giberelinas), y mayor energía interna para acelerar reacciones metabólicas y división celular.

Finalmente, la aplicación de campo magnético (100-150 mT por 10 minutos) en semillas de girasol mejoraron la germinación, específicamente reduciendo el tiempo medio de germinación y sincronizando la emergencia de las plántulas. La exposición a campo magnético tuvo efecto en diversos procesos fisiológicos como aumento de la actividad de α amilasa. Además, estimuló la división celular en raíces y la imbibición (Afzal et al. 2021). En maíz, la aplicación de campo magnético (100 mT por 15 minutos) estimuló la concentración de giberelinas, metabolitos secundarios como fenoles totales y flavonoides e incrementó el contenido de cenizas en germinados aumentando así su valor nutricional (Santos-Espinoza et al. 2023). Estos resultados demuestran que el tratamiento con campo magnético sugiere mecanismos que incluyen mayor **permeabilidad de membranas**, absorción de agua/nutrientes, promueve el metabolismo enzimático y antioxidante.

En la Figura 5 se muestra el crecimiento de la raíz embrionaria de las semillas de cacahuete a los 4 días después de la siembra posterior a la aplicación de las tecnologías físicas.

Una mayor longitud y grosor de la raíz embrionaria podría deberse a una combinación de eventos fisiológicos, activación hormonal (auxinas, giberelinas), división celular acelerada, mayor actividad enzimática, mejor absorción de agua, mayor síntesis de proteínas estructurales y protección antioxidante, todos ellos potenciados por técnicas físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético.

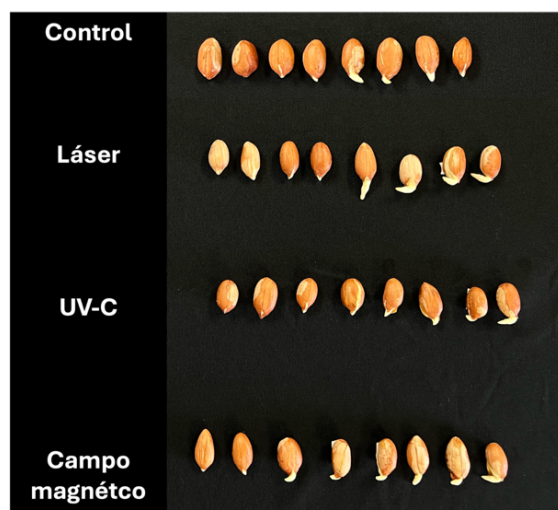


Figura 5. Crecimiento de la raíz embrionaria de las semillas de cacahuete a los 4 días después de la siembra posterior a la aplicación de las tecnologías físicas evaluadas.

La aplicación de tecnologías físicas en semillas todavía necesita una extensa investigación aplicada para definir la dosis óptima, el tiempo de exposición, las condiciones de irradiación dependientes del genotipo y del medio ambiente. Es importante mencionar que el tipo de semilla influye considerablemente en la respuesta a los tratamientos físicos como radiación UV-C, láser y campos magnéticos, debido a diferencias fisiológicas, bioquímicas y estructurales entre especies. Por lo tanto, en cada especie, es necesario identificar la dosis de irradiación o el punto de tiempo más adecuado para detener el tratamiento.

CONCLUSIONES

La aplicación de las tecnologías físicas como radiación UV-C, láser y campo magnético en semillas de cacahuete demostraron ser una alternativa biotecnológica eficaz para mejorar el porcentaje y velocidad de germinación de las semillas. Estos tratamientos físicos estimularon procesos fisiológicos que favorecen una germinación más rápida y uniforme, sin comprometer la viabilidad del embrión. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación demuestra que los efectos de los tratamientos físicos evaluados en las semillas ahora se deben abordar en múltiples niveles, que van desde aspectos morfoestructurales hasta cambios en la expresión génica y la acumulación de proteínas o metabolitos para poder conocer los mecanismos de interacción de las tecnologías físicas. El empleo de tecnologías físicas en semillas pueden ser herramientas sostenibles y no invasivas para optimizar la producción agrícola, representando una alternativa viable a métodos químicos tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada (No. 928992) de estudios del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología (DCAB) para el desarrollo de esta investigación.



REFERENCIAS

- Afzal, I., Saleem, S., Skalicky, M., Javed, T., Bakhtavar, M. A., ul Haq, Z., Kamran, M., Shahid, M., Sohail Saddiq, M., Afzal, A., Shafqat, N., Dessoky, E. S., Gupta, A., Korczyk-Szabo, J., Brestic, M., y E. L. Sabagh, A. (2021). Magnetic Field Treatments Improves Sunflower Yield by Inducing Physiological and Biochemical Modulations in Seeds. *Molecules*, 26(7). <https://doi.org/10.3390/molecules26072022>.
- Araújo, S.S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D. y Balestrazzi, A. (2016) Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and Challenges in Seed Technology. *Front. Plant Sci.* 7:646. [doi: 10.3389/fpls.2016.00646](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646).
- Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIA). (2024). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola cacahuete. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.
- Florez, M., Alvarez, J., Martinez, E. y Carbonell, V. (2019). Stationary magnetic field stimulates rice roots growth. *Romanian Reports in Physics*, 71, 713.
- Govindaraj M., Masilamani P., Alex Albert V. y Bhaskaran M. (2017). Effect of physical seed treatment on yield and quality of crops: A review. *Agricultural Reviews*, 38(1): 1-14. [doi: 10.18805/ag.v0i0F.7304](https://doi.org/10.18805/ag.v0i0F.7304).
- Gu, M., Shen, H., Ling, J., Yu, Z., Luo, W., Wu, F., Gu, F., y Hu, Z. (2025). Current Status and Development Strategies of the Research on Half-Feed Peanut Combine Harvester. *Sustainability*, 17(4),1708. <https://doi.org/10.3390/su17041708>.
- Gutiérrez-Miceli, Federico Antonio, León-Zenteno, Andrés, Santos-Espinoza, Ana Martin, Joya-Dávila, José Gregorio y Camas-Anzueto Jorge Luis. (2024). Aplicación de la tecnología láser en agricultura. *Revista Tecnología Digital*, artículo de divulgación, Vol. 14, No. 1, 2024, pp. 1-9. ISSN 2007-9400.
- Hasan, M., Hanafiah, M.M., Alhilfy, I.H.H. y Aeyad Taha Z. (2021). Comparison of the effects of two laser photobiomodulation techniques on bio-physical properties of *Zea mays* L. seeds. *PeerJ*, 15;9:e10614. [doi: 10.7717/peerj.10614](https://doi.org/10.7717/peerj.10614).
- Hernández-Aguilar, C., Dominguez-Pacheco, A., Cruz-Orea, A., Podleśna, A., Ivanov, R., Carballo-Carballo, A., y López-Bonilla, J. L. (2016). Bioestimulación láser en semillas y plantas. *Gayana. Botánica*. 73(1), 132-149. <https://doi.org/10.4067/s0717-66432016000100015>.
- Jelínková H., Šulc J. (2013). 2-Laser characteristics. *Lasers for Medical Applications*. 17-46. <https://doi.org/10.1533/9780857097545.1.17>.
- Kamel, R.M., El-kholy, M.M., Tolba, N.M. (2022). Influence of germicidal ultraviolet radiation UV-C on the quality of Apiaceae spices seeds. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 9, 89. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00358-4>.



- Korpetis, E., Ninou, E., Mylonas, I., Ouzounidou, G., Xynias, I.N., Mavromatis, A.G. (2023). Bread Wheat Landraces Adaptability to Low-Input Agriculture. *Plants*, 6;12(13):2561. [doi:10.3390/plants12132561](https://doi.org/10.3390/plants12132561).
- Lamichhane, J. R., Debaeke, P., Steinberg, C., You, M. P., Barbetti, M. J. y Aubertot, J. N. (2018). Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and Soil*, 432, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3780-9>.
- Limmongkon, A., Janhom, P., Amthong, A., Kawpanuk, M., Nopprang, P., Poohadsuan, J., Boonsong, T. (2017). Antioxidant activity, total phenolic, and resveratrol content in five cultivars of peanut sprouts. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(4), 332-338. [doi:10.1016/j.apjtb.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.01.002).
- Luckey, T.D. (1980). Hormesis with Ionizing Radiation; CRC press: Boca Raton, FL, USA, p. 222.
- Maffei (2014). Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front. Plant Sci*, 5, 445-465. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>.
- Mancipe-Murillo, C., Calderón-Hernández, M., Pérez-Martínez, L. V. (2018). Assessment of seed viability of 17 high andean tropical species by germination and tetrazolium tests. *Caldasia* vol.40 no.2. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v40n2.68251>.
- Menegatti, R.D., de Oliveira, L.O., da Costa, Á.V.L., Braga, E.J.B. y Bianchi, V.J. (2019). Magnetic field and gibberelic acid as pre-germination treatments of passion fruit seeds. *Revista Ciência Agrícola*, 17(1):15-22. [doi:10.28998/rca.v17i1.6522](https://doi.org/10.28998/rca.v17i1.6522).
- Nawkar, G. M., Maibam, P., Park, J. H., Sahi, V. P., Lee, S. Y., y Kang, C. H. (2013). UV-Induced Cell Death in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(1), 1608-1628. <https://doi.org/10.3390/ijms14011608>.
- Neelamegam R. y Sutha T. (2015). UV-C Irradiation Effect on Seed Germination, Seedling Growth and Productivity of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci*, 4(8): 430-443.
- Ruíz-Morales, I., Joya-Dávila, J. G., Gutiérrez-Miceli, F. A., y Santos-Espinoza, A. M. (2025). Efecto de la Radiación Láser en Semillas sobre la Germinación y Rendimiento del Cacahuete en Campo (*Arachis hypogaea* L.) *Latinoamericana*, 43, 1-10. e2005. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2005>.
- Sadeghianfar, P., Nazari, M. y Backes, G. (2019). Exposure to Ultraviolet (UV-C) Radiation Increases Germination Rate of Maize (*Zea mays* L.) and Sugar Beet (*Beta vulgaris*) Seeds. *Plants*, 8(2):49. [doi:10.3390/plants8020049](https://doi.org/10.3390/plants8020049).



- Santos-Espinoza, A. M., Ríos-Ruiz, A., Gutiérrez-Miceli, F. A., Abud-Archila, M., y Luján-Hidalgo, M. C. (2023). Effect of the elicitation with magnetic field of corn seeds on the development and nutrition of sprouts. *Agro Productividad*, 16(11), pp: 37-41. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i11.2720>.
- Sarraf, M., Kataria, S., Taimourya, H., Santos, L. O., Menegatti, R. D., Jain, M., Ihtisham, M., y Liu, S. (2020). Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*, 9(9), 1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>.
- Statgraphics Technologies (2009). Statgraphics Centurion XVI User's Manual. The Plains, VA, USA: Statgraphics Inc.
- Zhao, X., Chen, J. y Du, F. (2012). Potential use of peanut by-products in food processing: a review. *J Food Sci Technol*, 49(5), 521–529. [doi: 10.1007/s13197-011-0449-2](https://doi.org/10.1007/s13197-011-0449-2).



Caracterización de las comunidades fúngicas en un sistema de vermicomposteo enmendadas con residuos de conejo.

Serrano-Ramírez, Rocío del Pilar¹ (0000-0003-4601-331x), Zenteno-Rojas, Adalberto² (0000-0002-8853-3703), Vásquez-Hernández, Sugrey³ (0000-0003-1132-7386) y Montes-Molina, Joaquín Adolfo^{1*} (0000-0002-8258-8156)

¹ Tecnológico Nacional de México, Tuxtla Gutiérrez.; KM 29020, Carr. Panamericana 1080, Boulevares, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chis.; (S.R.R.P.); (V.H.S.), (M.M.J.A.).

² Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN).; Calzada Cerro Hueco s/n, El Zapotal, CP 29094, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.; (AZR).

* Montes Molina Joaquín Adolfo: joaquin.mm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

El manejo adecuado de los residuos orgánicos es clave para reducir riesgos sanitarios y mejorar la fertilidad del suelo. En este estudio se analizó cómo cambian las comunidades de hongos durante el proceso de compostaje y vermicompostaje de excretas de conejo, incluyendo también sus lixiviados (líquidos resultantes). Utilizando técnicas de secuenciación genética de última generación (plataforma MiSeq de Illumina), se identificaron los hongos presentes y se evaluó su posible impacto en la salud y el ambiente. Se observó que los hongos del grupo *Basidiomycota* fueron los más abundantes en todos los tratamientos. Destaca la notable reducción del hongo *Microascus*, potencialmente patógeno para humanos, cuya presencia inicial del 37 % disminuyó hasta niveles tan bajos como 1 % en los lixiviados del compost. Esto indica que el proceso, especialmente el vermicompostaje, puede ayudar a minimizar riesgos para la salud. Además, se detectó una alta presencia de hongos saprotróficos como *Aspergillus* y *Acremonium*, conocidos por descomponer materia orgánica y liberar nutrientes beneficiosos para el suelo. Estos hallazgos muestran que el vermicompostaje no solo es efectivo para reducir hongos dañinos, sino que también promueve comunidades microbianas que favorecen la sostenibilidad agrícola. Así, se reafirma su potencial como una herramienta ecológica y segura para la gestión de residuos y el mejoramiento de suelos.

Palabras clave: hongos, patógenos, lixiviados, vermicomposta.

INTRODUCCION

En la agricultura actual, encontrar formas sostenibles de manejar los residuos orgánicos es esencial para reducir el uso de fertilizantes químicos, proteger el medio ambiente y mantener suelos saludables. El compostaje y el vermicompostaje procesos naturales que transforman los desechos en abono mediante la



acción de microorganismos y lombrices se han convertido en herramientas clave para lograrlo. Entre sus beneficios se incluye la mejora de la fertilidad del suelo, el reciclaje de nutrientes y la reducción de contaminantes.

En este contexto, los hongos juegan un papel central: algunos descomponen materiales difíciles como la celulosa y la lignina, liberando nutrientes esenciales para las plantas, mientras que otros contribuyen a mantener el equilibrio ecológico del suelo al interactuar con bacterias y raíces, e incluso ayudan a controlar enfermedades vegetales. Sin embargo, no todos los hongos son beneficiosos. Algunas especies, como *Microascus*, pueden ser peligrosas para la salud humana si los residuos no se tratan adecuadamente.

Este estudio se propuso analizar y comparar las comunidades de hongos presentes en sistemas de compostaje y vermicompostaje usando estiércol de conejo, con énfasis en su diversidad ecológica y su impacto potencial en la salud y la agricultura sostenible. Conocer cómo varían estas comunidades permite mejorar el manejo de los residuos, reducir riesgos sanitarios y aprovechar al máximo sus beneficios como fertilizantes naturales. Así, se aporta información clave para avanzar hacia una agricultura más segura, eficiente y respetuosa con el ambiente (Sayara et al., 2020; Lin et al., 2022; Vázquez-Villegas et al., 2021; Bouhia et al., 2023; Pampillón-González et al., 2017; Gutiérrez-Miceli et al., 2016; Sall et al., 2019; Hernandez-Lara et al., 2021; Fierer, 2017; Anastasi et al., 2013; Ligginstoffer et al., 2010; Pavan et al., 2021; Gloor et al., 2020; Okuda et al., 2022; Vyas et al., 2022; Zhong et al., 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se enfocó en entender cómo las comunidades de hongos cambian y actúan durante el compostaje y vermicompostaje de excremento de conejo, un residuo agropecuario con gran potencial como fertilizante natural. Para ello, se prepararon mezclas de excremento de conejo, bagazo de caña de azúcar y tierra, en una proporción de 30:30:40. Se compararon dos procesos: uno de compostaje tradicional (sin lombrices) y otro de vermicompostaje, en el que se añadieron lombrices rojas californianas (*Eisenia fetida*), conocidas por acelerar la descomposición y enriquecer el producto final (Serrano-Ramírez et al., 2021).

Ambos tratamientos se colocaron en contenedores de PVC especialmente diseñados para recolectar lixiviados los líquidos que se generan durante el proceso. Se establecieron cuatro grupos de análisis: compost, vermicompost, lixiviado de compost y lixiviado de vermicompost, cada uno con cuatro réplicas. Durante 90 días, las mezclas se mantuvieron a la sombra, se revolvieron semanalmente y se les ajustó la humedad regularmente para asegurar un proceso controlado. Después, los lixiviados fueron almacenados por 30 días más en completa oscuridad, simulando condiciones de uso agrícola.

Además de observar los cambios visibles en los materiales, se analizaron sus propiedades fisicoquímicas, como el pH, la conductividad eléctrica, y los niveles de nitrógeno y carbono orgánico, indicadores clave de calidad para los fertilizantes orgánicos.

Para estudiar la diversidad de hongos, los científicos tomaron muestras en distintos momentos del proceso y extrajeron ADN de los sólidos (composta y vermicomposta) y de los sedimentos en los lixiviados. Este material genético fue amplificado y secuenciado utilizando una tecnología avanzada (Illumina MiSeq), enfocada en una región específica del ADN de los hongos, lo que permitió identificarlos con alta precisión. Se obtuvieron más de 27 mil secuencias de alta calidad, que representaron 234 variantes diferentes de hongos (Hoffman y Winston, 1987; Sambrook y Russell, 2001; Valenzuela-Encinas et al., 2008).

Estos datos fueron analizados con herramientas bioinformáticas especializadas, que permitieron clasificar los hongos por tipo y función, por ejemplo, si eran descomponedores, simbióticos o patógenos. También se



evaluaron las diferencias entre los tratamientos y se investigó cómo las propiedades del sustrato influían en la composición de las comunidades fúngicas.

Los análisis estadísticos y visuales se realizaron con programas especializados en análisis de datos biológicos, como R y QIIME2. Se usaron modelos multivariados para identificar patrones, comparaciones entre grupos y relaciones entre los hongos y las condiciones físico-químicas de la composta (v0.99, Bisanz, 2018; McMurdie y Holmes, 2013; v3.5; Wickham, 2016; v2.6-4, Oksanen et al., 2019; Gloor et al., 2020; Quinn et al., 2019; Love et al., 2014; Conway et al., 2017)

Esta metodología robusta permitió no solo conocer qué tipos de hongos estaban presentes, sino también entender cómo estos microorganismos interactúan con su entorno y con otros elementos del proceso de compostaje, generando información valiosa para el desarrollo de fertilizantes orgánicos más seguros, eficientes y sostenibles.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Características fisicoquímicas

El estudio analizó cómo cambian ciertas propiedades clave del compost y el vermicompost durante su transformación a partir de estiércol de conejo, mezclado con tierra y bagazo de caña. Se midieron indicadores como el pH, la conductividad eléctrica (CE), el carbono orgánico total (COT) y el nitrógeno total (NT), fundamentales para evaluar su calidad como fertilizantes orgánicos.

Al inicio, el sustrato tenía un pH neutro, pero tras 90 días, tanto el compost como el vermicompost se volvieron más alcalinos, señal de una descomposición avanzada de la materia orgánica. La CE, que indica la cantidad de sales solubles, disminuyó en los materiales sólidos, lo que refleja una mayor estabilidad del abono. Sin embargo, en los lixiviados los líquidos generados durante el proceso la CE fue mucho más alta, lo que sugiere una alta concentración de nutrientes disueltos.

El contenido de carbono disminuyó considerablemente, ya que se libera como CO₂ durante la descomposición. Por otro lado, el nitrógeno aumentó, sobre todo en los lixiviados, alcanzando niveles muy altos. Esto indica que estos líquidos son especialmente ricos en nutrientes y tienen gran potencial como biofertilizantes líquidos naturales para la agricultura (Tabla 1).

Tabla 1 Caracterización fisicoquímica del sustrato inicial, compost, de los lixiviados obtenidos del compostaje, vermicompost, de los lixiviados obtenidos del vermicompostaje de conejos utilizando *E. fétida*.

Tratamiento	pH	CE (mS/m)	N Total (g /kg ss)	C Organico (g /kg ss)
Sustrato inicial	7.0 ^b ±0.08	2.75 ^b ±0.01	4.77 ^c ±0.09	307.66 ^c ±0.57
Composta	7.9 ^{a*} ±0.19	0.75 ^c ±0.06	8.16 ^d ±0.00	156.33 ^d ±0.57
Lixiviado de composta	8.0 ^a ±0.05	8.02 ^a ±0.05	49.28 ^b ±0.38	411.49 ^b ±0.44
Vermicomposta	8.3 ^a ±0.14	0.73 ^c ±0.21	9.20 ^c ±0.01	156.66 ^d ±0.57
Lixiviado de vermicomposta	8.0 ^a ±0.09	8.04 ^a ±0.09	92.41 ^a ±0.37	860.12 ^c ±2.74



Diversidad alfa de la comunidad fúngica

El estudio evaluó cómo cambia la diversidad de hongos durante el compostaje y el vermicompostaje de estiércol de conejo, usando distintos índices ecológicos. Al inicio, el sustrato presentaba la mayor variedad y cantidad de especies fúngicas. Sin embargo, tras los procesos de descomposición, estas métricas disminuyeron notablemente.

El compostaje y la vermicomposta mostraron una reducción en la cantidad de especies, y esta disminución fue aún más marcada en los lixiviados (líquidos generados durante el proceso). En conjunto, estos resultados muestran que, aunque los procesos de compostaje reducen la diversidad fúngica, ciertos productos como el lixiviado de vermicomposta pueden mantener una comunidad fúngica más equilibrada, lo que podría influir positivamente en su uso como biofertilizante.

Dinámica de la Comunidad Fúngica

La composición de los hongos presentes en el estiércol de conejo y sus derivados cambió significativamente según el tipo de tratamiento aplicado. Al analizar los principales grupos fúngicos, se observó que *Basidiomycota* fue el más abundante en el sustrato original (98%) y en el compost (92%), pero disminuyó considerablemente en el vermicomposta (38%) y sus lixiviados (53%). Otro grupo destacado, *Rozellomycota*, tuvo una presencia importante especialmente en el lixiviado de compost (62%) y en el vermicomposta (25%) (Figura 1A).

Además, un porcentaje relevante de hongos encontrados no pudo ser identificado con precisión, lo que resalta la complejidad de estas comunidades microbianas. A nivel de género, *Microascus*, un hongo potencialmente patógeno, fue predominante en el sustrato original (37%) pero su presencia disminuyó de forma considerable tras los tratamientos, lo que indica que el compostaje y el vermicompostaje pueden reducir hongos indeseables.

Por otro lado, géneros benéficos como *Aspergillus* y *Preussia*, conocidos por su papel en la descomposición de materia orgánica, fueron más abundantes en el vermicomposta, lo que sugiere que este tratamiento promueve una comunidad fúngica más favorable para el suelo. En resumen, los tratamientos modifican significativamente las comunidades fúngicas, mejorando su perfil para aplicaciones agrícolas sostenibles (Figura 1B).

El análisis de las comunidades fúngicas se correlacionan con agrupamientos según el tipo de tratamiento aplicado. El sustrato inicial y el composta compartieron características similares, mientras que los lixiviados de vermicomposta formaron un grupo definido. Algunos hongos, como *Acremonium* y *Myriococcum*, estuvieron asociados con altos niveles de carbono y nitrógeno, mientras que *Preussia* mostró lo contrario. Por su parte, *Microascus* y *Aspergillus* se pueden relacionar con el pH, lo que sugiere que condiciones más ácidas podrían favorecer su presencia. Estos patrones ayudan a entender cómo los tratamientos influyen en la composición fúngica del suelo.

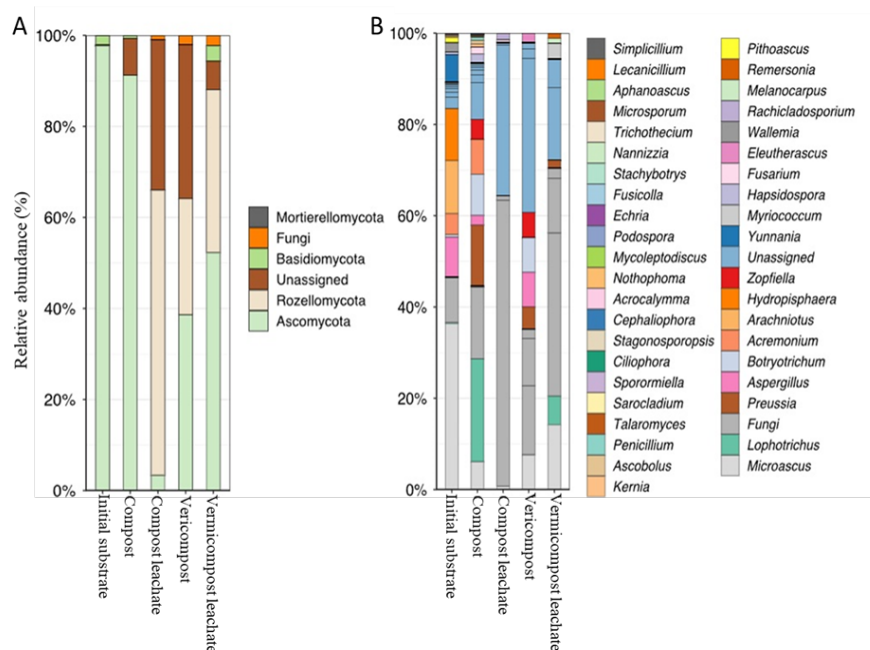


Figura 1. La estructura de la comunidad fúngica se basa en la abundancia relativa de las variantes de la secuencia de amplicones asignadas hasta a) el nivel taxonómico de filo y hasta b) el nivel taxonómico de género. Los grupos taxonómicos y sus colores correspondientes están ordenados de mayor a menor abundancia en promedio para todos los tratamientos (n = 5).

El análisis reveló que el sustrato inicial contenía la mayor variedad de hongos, mientras que el vermicompostaje y su lixiviado mostraron la menor diversidad (Figura 1AyB). Esto indica que el proceso de vermicompostaje reduce significativamente la variedad de hongos presentes. Además, se observó que el compostaje y el sustrato inicial compartían muchas especies, a diferencia del vermicompostaje, que presentó menos coincidencias. Estos resultados sugieren que las lombrices y las condiciones del vermicompostaje modifican selectivamente las comunidades fúngicas, favoreciendo ciertos grupos y eliminando otros, lo que puede influir en la calidad biológica del fertilizante final.

Los procesos de compostaje y vermicompostaje afectan de manera distinta las comunidades de hongos en los residuos orgánicos. Mientras el compostaje reduce la presencia de géneros como *Preussia*, *Fusarium* y *Penicillium*, el vermicompostaje favorece la proliferación de hongos como *Aspergillus*, *Acremonium* y *Hydropisphaera*. Además, el vermicompostaje promueve un grupo único de especies fúngicas que no aparecen en el compostaje tradicional. Estos hallazgos muestran que el uso de lombrices no solo transforma la materia orgánica, sino que también modifica la diversidad y estructura de los hongos, influyendo en la calidad del fertilizante final (Figura 1AyB).

El papel de los hongos en el compostaje y vermicompostaje: mejorando la fertilidad del suelo y el reciclaje de nutrientes

Los hongos del suelo son actores esenciales en el equilibrio de los ecosistemas, participando en procesos vitales como el secuestro de carbono y la mineralización de nutrientes, que mantienen la salud del suelo y



favorecen el crecimiento vegetal. En este estudio, exploramos cómo los procesos de compostaje y vermicompostaje dos métodos biológicos para transformar residuos orgánicos en fertilizantes naturales—afectan la composición y función de las comunidades fúngicas, así como las propiedades fisicoquímicas de los productos finales (Landínez-Torres et al., 2020; Liu et al., 2019; Pan et al., 2013; Wang et al., 2021; Ramnarain et al., 2019).

Cambios en las propiedades fisicoquímicas

Durante el compostaje y vermicompostaje, observamos un aumento significativo del pH, lo que indica que el material orgánico se está estabilizando y creando un ambiente más alcalino. Esto es beneficioso porque facilita la actividad microbiana que impulsa la descomposición y el reciclaje de nutrientes. Un hongo llamado *Botryotrichum*, conocido por prosperar en condiciones alcalinas, aumentó notablemente en estos tratamientos, lo que sugiere que se adapta bien a los cambios químicos generados.

La conductividad eléctrica, que refleja la concentración de sales solubles, disminuyó en los residuos sólidos pero aumentó en los lixiviados los líquidos generados durante el proceso, que se enriquecieron con nutrientes minerales valiosos. Esto posiciona a estos lixiviados como prometedores biofertilizantes líquidos, capaces de aportar nutrientes esenciales a los cultivos.

Además, durante el vermicompostaje, las lombrices de tierra y ciertos hongos liberan enzimas que descomponen la materia orgánica y aumentan el contenido de nitrógeno, un nutriente fundamental para las plantas. De hecho, detectamos aumentos significativos de nitrógeno en el compost, vermicompost y sus lixiviados, reafirmando el potencial fertilizante de estos productos.

Por otro lado, el carbono orgánico disminuyó durante estos procesos, lo que es esperable ya que el carbono se utiliza como fuente de energía durante la degradación de la materia orgánica, principalmente gracias a la actividad de hongos como *Preussia* y *Myriococcum*, que producen enzimas capaces de romper compuestos complejos como la celulosa (Ordoñez-Arévalo et al., 2018; Suthar, 2007; Usmani et al., 2019; Yavaraj et al., 2021).

Diversidad y funciones de los hongos durante el proceso

Un hallazgo central de este estudio fue que el compostaje y el vermicompostaje no solo cambian la cantidad y tipos de hongos presentes, sino que también favorecen hongos especializados que desempeñan funciones clave en la descomposición y reciclaje de nutrientes. La especie disminuyeron a medida que avanzaba el proceso, indicando una selección natural de hongos adaptados a las condiciones específicas del compostaje o vermicomposta (Serrano-Ramírez et al. 2021; Suthar, 2007; Gutiérrez-Miceli et al., 2011; Sall et al., 2019; Yuvaraj et al., 2021; El-Gindy, 2021; Seddouk et al., 2022).

Sin embargo, ciertos géneros fúngicos como *Aspergillus*, *Acremonium* y *Preussia* persistieron y en algunos casos aumentaron su abundancia. Estos hongos son esenciales para descomponer materiales vegetales difíciles de degradar, como la celulosa y la lignina, gracias a la producción de enzimas hidrolíticas especializadas. Por ejemplo, *Aspergillus* es un conocido degradador de polímeros vegetales, y *Preussia* juega un papel en la transformación y estabilización del nitrógeno, un nutriente crucial para el suelo.

El vermicompostaje destacó por aumentar la presencia de hongos beneficiosos como *Aspergillus* y *Acremonium*, lo que sugiere que este proceso no solo acelera la descomposición sino que también promueve comunidades fúngicas que mejoran la fertilidad del suelo. Estos hongos liberan nutrientes esenciales que pueden ser fácilmente absorbidos por las plantas, mejorando así su crecimiento y resistencia.



Un aspecto muy relevante fue la presencia exclusiva de *Botryotrichum* en los lixiviados de vermicompostaje, un hongo adaptado a ambientes alcalinos que contribuye a la descomposición de materia orgánica bajo estas condiciones, y que podría ser clave para gestionar residuos en suelos con pH elevado (Garg y Kaushik, 2005; Suthar, 2006)

Reducción de hongos patógenos y seguridad agrícola

El vermicompostaje mostró también una reducción significativa en hongos patógenos como *Fusarium*, un hallazgo con gran impacto para la agricultura, pues implica que este método puede disminuir los riesgos de enfermedades transmitidas por residuos orgánicos, mejorando la seguridad de los fertilizantes orgánicos producidos. Esto confirma estudios previos que destacan al vermicompostaje como una estrategia sostenible y segura para la gestión de desechos orgánicos.

Funciones ecológicas

El análisis ecológico de las comunidades fúngicas muestra que los hongos saprótrofos, aquellos que descomponen materia muerta fueron predominantes en casi todos los tratamientos, reafirmando su rol en el reciclaje de nutrientes. También se encontraron hongos con funciones múltiples, como simbioses que establecen relaciones beneficiosas con plantas, y patógenos en menor medida, especialmente en el sustrato inicial. La disminución de hongos patógenos en los productos finales apunta a la eficacia del compostaje y vermicompostaje para mejorar la calidad biológica de los fertilizantes.

La mayor abundancia (Figura 1) de hongos saprótrofos en el vermicompostaje sugiere que este proceso promueve comunidades fúngicas activas que pueden generar metabolitos y enzimas complejos, ayudando a transformar compuestos difíciles de degradar en nutrientes disponibles para las plantas (Neher et al., 2013; Meng et al., 2019; Irawan et al., 2023; Seddouk et al., 2022; Irawan et al., 2023; Dong et al., 2021; Hernández-Lara et al., 2021; Serrano-Ramírez et al., 2021; Sun et al., 2022; Ravindran y Naveenan, 2011; Frey et al., 2004; Liggenstoffer et al., 2010; Jaber y Vidal, 2019; Kasselaki et al., 2016; Shang et al., 2018; Yang et al., 2019; Suthar, 2006; Moreno et al., 2021).

Impacto agronómico y ambiental

Los resultados evidencian que los productos derivados del compostaje y vermicompostaje, tanto sólidos como líquidos, contienen comunidades fúngicas beneficiosas que pueden usarse para mejorar la fertilidad del suelo, controlar patógenos y contribuir a la sostenibilidad agrícola. La actividad microbiana contribuye a la estabilización del estiércol, retención de nitrógeno y liberación gradual de fósforo, elementos clave para la nutrición vegetal.

Además, el vermicompostaje favorece la producción de metabolitos secundarios valiosos, algunos con aplicaciones farmacéuticas, y mejora la aireación y estabilidad del material orgánico. Esto explica por qué varios estudios muestran que el vermicompostaje suele superar al compostaje tradicional en cuanto a beneficios para el crecimiento vegetal y la salud del suelo (Amobonye et al., 2023; Vyas et al., 2022; Frac et al., 2018; Okuda et al., 2022; Moreno et al., 2021; Ning et al., 2021; Ayilara et al., 2021; De Corato et al., 2019; Sayara et al., 2020; Lazcano et al., 2008; Vyas et al., 2022 y Ducasse et al., 2022).

CONCLUSIONES



Este estudio resalta la importancia de comprender la dinámica de las comunidades fúngicas en los procesos de compostaje y vermicompostaje, ya que estos microorganismos no solo son esenciales para la descomposición y reciclaje de nutrientes, sino que también influyen en la calidad y seguridad de los fertilizantes orgánicos. El vermicompostaje, en particular, promueve hongos funcionalmente activos que mejoran la fertilidad del suelo y reducen la presencia de patógenos, consolidándose como una herramienta ecológica efectiva para la gestión de residuos orgánicos y la producción agrícola sostenible. El aprovechamiento de estos conocimientos puede guiar prácticas agrícolas más limpias y eficientes, que optimicen el uso de recursos naturales y fomenten la salud de los ecosistemas terrestres a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Rocio Pilar Serrano-Ramírez recibió una subvención de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, México), 590480, otorgada para programas de doctorado en el Tecnológico Nacional de México.

REFERENCIAS

- Amobonye, A., Aruwa, C.E., Aransiola, S., et al., 2023. The potential of fungi in the bioremediation of pharmaceutically active compounds: a comprehensive review. *Front. Microbiol.* 14, 1207792. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1207792>
- Andrews, S. 2019. FastQC: A quality control tool for high throughput sequence data. Babraham Institute. Available online at <https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/> (accessed September 2, 2023).
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International. (2000). *Official Methods of Analysis* (17th ed., Vol. II). Gaithersburg, Maryland, USA: AOAC International.
- Ayilara, M.S., Olanrewaju, O.S., Babalola, O.O., Odeyemi, O., 2021. Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*. 12(11), 4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Bisanz, J.E., 2018. qiime2R: Importing QIIME2 artifacts and associated data into R sessions. <https://github.com/jbisanz/qiime2R>
- Bolyen, E., Rideout, J.R., Dillon, M.R., et al., 2019. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nat Biotechnol.* 37, 852-857. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9>
- Bouhia, Y., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Lyamlouli, K., 2023. Olive mill waste sludge: From permanent pollution to a highly beneficial organic biofertilizer: a critical review and future perspectives. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 259, 114997. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114997>
- Callahan, B.J., McMurdie, P.J., Rosen, M.J., et al., 2016. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nat Methods*. 13, 581-583. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3869>
- Conway, J.R., Lex, A., Gehlenborg, N., 2017. UpSetR: an R package for the visualization of intersecting sets and their properties. *Bioinformatics*. 33 (18), 2938-2940. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx364>
- De Corato, U., Patruno, L., Avella, et al., 2019. Composts from green sources show an increased suppressiveness to soilborne plant pathogenic fungi: relationships between physicochemical properties, disease suppression, and the microbiome. *Crop Prot.* 124, 104870. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104870>
- Dong, M., Shao, Y., Xu, Z., Liu, X., et al., 2021. Resilience of fungal flora in bauxite residues amended with organic matter and vermiculite/fly ash. *J Environ Manage.* 284, 112052. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112052>
- Ducasse, V., Capowiez, Y., Peigné, J., 2022. Vermicomposting of municipal solid waste as a possible lever for the development of sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 89. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00819-y>
- El-Gindy, A.A., 2021. Production of cellulase(s) by *Myriococcum albomyces*. *Zentralblatt für Mikrobiologie*. 146 (3), 193-196
- Frac, M., Hannula, S.E., Bełka, M., Jędrzycka, M., 2018. Fungal biodiversity and their role in soil health. *Front. Microbiol.* 9, 707. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00707>
- Frey, S.D.; Knorr, M.; Parrent, J.L.; Simpson, R.T., 2004. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Ecol Manag.* 2004, 196, 159–71. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.018>



- Fierer, N., 2017. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nat. Rev. Microbiol.* 15 (10), 579-590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Garg, V.K., Kaushik, P., 2005. Vermistabilization of textile mill sludge spiked with poultry droppings by an epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresour Technol.* 96 (9), 1063-71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.003>
- Gloor, G.B., Fernandes, A.D., Macklaim, J.M., 2020. Analysis of differential abundance taking sample variation into account: Package "ALDEx2". https://github.com/ggloor/ALDEx_bioc
- Gutiérrez-Miceli, F.A., Oliva-Llaven, M.A., Mendoza-Nazar, P., et al., 2011. Optimization of vermicompost and wormbed leachate for the organic cultivation of radish. *J Plant Nutr.* 34: 1642- <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.592561>
- Gutiérrez-Miceli, F.A., García-Gómez R.C., Oliva-Llaven M.A., et al., 2016. Vermicomposting leachate as liquid fertilizer for the cultivation of sugarcane (*Saccharum* sp.). *J Plant Nutr.* 40, 140-149. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1193610>
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Cuartero, J., et al., 2021. Bacterial and fungal community dynamics during different stages of agro-industrial waste composting and its relationship with compost suppressiveness. *Sci. Total. Environ.* 805, 150330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150330>
- Hoffman, C.S., Winston, F.A., 1987. Ten-minute DNA preparation from yeast efficiently releases autonomous plasmids for transformation of *Escherichia coli*. *Gene.* 57 (2-3), 267-272. [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(87\)90131-4](https://doi.org/10.1016/0378-1119(87)90131-4)
- Irawan, B., Saputra, A., Farisi, S., et al., 2023. The use of cellulolytic *Aspergillus* sp. inoculum to improve the quality of Pineapple compost. *AIMS microbiol.* 9 (1), 41-54. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2023003>
- Jaber, L.R., Vidal, S., 2019. Interactions between an endophytic fungus, aphids, and extrafloral nectaries: Do endophytes induce extrafloral-mediated defences in *Vicia faba*? *Functional Ecology.* 23 (4): 707-714. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01554.x>
- Kasselaki, A.M., Shaw, M.W., Malathrakis, N.E., Haralambous, J., 2016. Control of *Leveillulaurica* in tomato by *Acremonium alternatum* is by induction of resistance, not hyperparasitism. *Eur. J. Plant Pathol.* 115 (2): 263-267. <https://doi.org/10.1007/s10658-006-9010-y>
- Köljal, U., Nilsson, R.H., Abarenkov, K., et al., 2013. Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi. *Molecular ecology.* 22 (21), 5271-5277. <https://doi.org/10.1111/mec.12481>
- Landínez-Torres, A.Y., Becerra-Abril, J.L., Tosi, S., Nicola, L., 2020. Soil microfungi of the colombian natural regions. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 17 (22), 8311. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228311>
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., Domínguez, J., 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere.* 72, 1013-1019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.016>
- Liggenstoffer, A.S., Youssef, N.H., Couger, M.B., Elshahed, M.S., 2010. Phylogenetic diversity and community structure of anaerobic gut fungi (phylum Neocallimastigomycota) in ruminant and non-ruminant herbivores. *The ISME Journal.* 4: 1225-1235. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.49>
- Liu, B., Wu, C., Pan, P., et al., 2019. Q. Remediation effectiveness of vermicompost for a potentially toxic metal contaminated tropical acidic soil in China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 182, 109394. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109394>
- Lin, C., Cheruiyot, N.K., Bui, X.T., Ngo, H.H. 2022. Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered.* 13(1), 1073–1089. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>
- Love, M.I., Huber, W., Anders, S., 2014. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. *Genome Biology.* 5 (12), 550. <https://doi.org/10.1186/s13059-014-0550-8>
- McMurdie, P.J., Holmes, S., 2013. Phyloseq: An R package for reproducible interactive analysis and graphics of microbiome census data. *PLoS ONE.* (4), e61217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061217>
- Meng, Q., Yang, W., Men, M., et al., 2019. Microbial community succession and response to environmental variables during cow manure and corn straw composting. *Front. Microbiol.* 10, 529. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00529>
- Montoya-Ciriaco, N., Gómez-Acata, S., Muñoz-Arenas, L.C., et al., 2020. Dietary effects on gut microbiota of the mesquite lizard *Sceloporus grammicus* (Wiegmann, 1828) across different altitudes. *Microbiome.* 8 (1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-0783-6>
- Moreno, J., López-González, J.A., Arcos-Nievas, M.A., et al., 2021. Revisiting the succession of microbial populations throughout composting: A matter of thermotolerance. *Sci. Total Environ.* 773, 145587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145587>
- Neher, D.A., Weicht, T.R., Bates, S.T., et al., 2013. Changes in bacterial and fungal communities across compost recipes, preparation methods, and composting times. *PLoS ONE.* 8 (11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079512>
- Nguyen, N.H., Song, Z., Bates, S.T., 2016. FUNGuild: An open annotation tool for parsing fungal community datasets by ecological guild. *Fungal Ecology.* 20, 241-248. <https://doi.org/10.1016/J.FUNECO.2015.06.006>



- Ning, J.Y., Zhu, X.D., Zu, H.G., Yu, G.H., 2021. Coupling thermophilic composting and vermicomposting processes to remove Cr from biogas residues and produce high value-added biofertilizers. *Bioresour. Technol.* 329, 124869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124869>
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., et al., 2019. Wagner, H. Vegan: Community ecology package. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (version 2.5). <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Okuda, Y., 2022. Sustainability perspectives for future continuity of mushroom production: The bright and dark sides. *Front. sustain. food syst.* <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1026508>
- Ordoñez-Arévalo, B., Guillén-Navarro, K., Huerta, E., et al., 2018. Enzymatic dynamics into the *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) gut during vermicomposting of coffee husk and market waste in a tropical environment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 (2), 1576-1586. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0572-3>
- Pan, P., Liu, H., Liu, A., et al., 2013. Rhizosphere environmental factors regulated the cadmium adsorption by vermicompost: Influence of pH and low-molecular-weight organic acids. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 266, 115593. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115593>
- Pampillón-González, L., Ortiz-Cornejo, N.L., Luna-Guido, M., et al., 2017. Archaeal and bacterial community structure in an anaerobic digestion reactor (Lagoon Type) used for biogas production at a pig farm. *J. Mol. Microbiol.* 27 (5), 306-317. <https://doi.org/10.1159/000479108>
- Pavan, H.V., Murthy S.M., Jogaiah S., 2021. Explorations of fungal diversity in extreme environmental conditions for sustainable agriculture applications. *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites*. Elsevier. pp. 483-494. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822919-4.00021-1>
- Quinn, T.P., Erb, I., Gloor, G., et al., 2019. A field guide for the compositional analysis of any-omics data. *GigaScience*. 8 (9), [giz107](https://doi.org/10.1093/gigascience/giz107). <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz107>
- R Core Team., 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>
- Romero-Tepal, E.M., Contreras-Blancas, E., Navarro-Noya, Y.E., et al., 2014. Changes in the bacterial community structure in stored wormbed leachate. *J. Mol. Microbiol.* 24 (2), 105-113. <https://doi.org/10.1159/000357915>
- Ramnarain, Y.I., Ansari, A.A., Ori, L., 2019. Vermicomposting of different organic materials using the epigeic earth-worm *Eisenia foetida*. *IJROWA*. 8 (1), 23-36. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0225-7>
- Ravindran, C., Naveenan, T., 2011. Adaptation of marine derived fungus *Chaetomium globosum* (NIOCC 36) to alkaline stress using antioxidant. *Process Biochem.* 46, 847-857. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.12.005>
- Sall, P.M., Antoun, H., Chalifour, F., Beauchamp, C.J., 2019. Potential use of leachate from composted fruit and vegetable waste as fertilizer for corn and vegetable waste as fertilizer for corn. *Cogent Food Agric.* 5, 1-14. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1580180>
- Shang, S.Q., Chen, Y.N., Bai, Y.L., 2018. The pathogenicity of entomopathogenic fungus *Acremonium hansfordii* to two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* and predatory mite *Neoseiulus barkeri*. *SAA*. 23 (11), 2173-2183. <https://doi.org/10.11158/saa.23.11.10>
- Sambrook, J., Russell, D.W., 2001. Molecular cloning: A laboratory manual. Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., Sánchez, A., 2020. Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*. 10 (11), 1838. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
- Seddouk, L., Jamai, L., Tazi, K., et al., 2022. Isolation and characterization of a mesophilic cellulolytic endophyte *Preussia africana* from *Juniperus oxycedrus*. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (30), 45589-45600. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19151-9>
- Serrano-Ramírez R.P., Hernández-Guzmán M., Ruiz-Valdiviezo V.M., Montes-Molina J.A., 2021. Study of Bacterial communities in different types of leachates and their impact on *Solanum lycopersicum* production in greenhouses. *J Soil Sci Plant Nutr.* 21, 1170-1181. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00430-2>
- Sun, X., Zhang, C., Bei, S., et al., 2022. High bacterial diversity and siderophore-producing bacteria collectively suppress *Fusarium oxysporum* in maize/faba bean intercropping. *Front. Microbiol.* 13, 972587. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.972587>
- Suthar, S., 2006. Potential utilization of Guar gum industrial waste in vermicompost production. *Bioresour Technol.* 97 (18), 2474-7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.018>
- Suthar, S., 2007. Nutrient changes and bio dynamics of epigeic earthworm *Perionyx excavatus* (Perrier) during recycling of some agriculture wastes. *Bioresour. Technol.* 98, 1608-1614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.001>
- Usmani, Z., Kumar, V., Rani, R., et al., 2019. A. Changes in physico-chemical, microbiological and biochemical parameters during composting and vermicomposting of coal fly ash: a comparative study. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16 (8), 4647-4664. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1893-6>



- Valenzuela-Encinas, C., Neria-González, I., Alcántara-Hernández, R.J., et al., 2008. Phylogenetic analysis of the archaeal community in an alkaline-saline soil of the former lake Texcoco (Mexico). *Extremophiles*. 12 (2), 247-254. <https://doi.org/10.1007/s00792-007-0121>
- Vázquez-Villegas, P.T., Meza-Gordillo, R., Cruz-Salomón, A., et al., 2021. Vermicomposting Process to Endosulfan Lactone Removal in Solid Substrate Using *Eisenia fetida*. *Processes*, 9, 396. <https://doi.org/10.3390/pr9020396>
- Vyas, P., Sharma, S., Gupta, J., 2022. Vermicomposting with microbial amendment: implications for bioremediation of industrial and agricultural waste. *BioTechnologia (Pozn)*. 29, 103 (2), 203-215. <https://doi.org/10.5114/bta.2022.116213>
- Wang, F., Zhang, W., Miao, L., et al., 2021. The effects of vermicompost and shell powder addition on Cd bioavailability, enzyme activity and bacterial community in Cd-contaminated soil: a field study. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 215, 112163. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112163>
- White, T.J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J., 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J., White, T.J. (Eds) *PCR protocols: a guide to methods and applications*, Academic Press. 315-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag. New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Yang, W., Jing, X., Guan, Y., et al., 2019. Response of fungal communities and co-occurrence network patterns to compost amendment in black soil of Northeast China. *Front. Microbiol.* 10, 1562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01562>
- Yuvaraj, A., Thangaraj, R., Ravindran, B., et al., 2021. Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology-A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability. *Environmental pollution*. (Barking, Essex: 1987), 268(PtA), 115688. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115688>
- Zhong, X.Z., Li, X.X., Zeng, Y., et al., 2020. Dynamic change of bacterial community during dairy manure composting process revealed by highthroughput sequencing and advanced bioinformatics tools. *Bioresour. Technol.* 306, 123091. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123091>



Identificación molecular y caracterización bioquímica del potencial de biocontrol de la cepa nativa extremófila *Brevibacillus* sp. VCA3.

Martínez-López, Nancy Abril ¹ (0009-0001-9705-9943), Yedra-Ramos, Clara del Rosario ¹ y Ruíz-Valdiviezo, Víctor Manuel ^{1*} (0000-0003-0572-8845)

¹ Laboratorio de Biología Molecular, Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez. Carr. Panamericana 1080, Boulevares, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; (M.L.N.A.); (Y.R.C.R.), (R.V.V.M).

* Autor por correspondencia: bioqvic@hotmail.com

RESUMEN

En los últimos años, México ha experimentado un aumento en la demanda de producción de alimentos y con ello la utilización excesiva de pesticidas y fungicidas químicos, los cuales se emplean para el control de fitopatógenos que causan afectaciones en los cultivos y sus derivados, provocando severos daños en la fertilidad de los suelos, diversidad microbiana benéfica y, además, riesgos para la salud humana. En este presente estudio se aisló, identificó y se evaluó el potencial de biocontrol de una cepa bacteriana nativa extremófila del lago-cráter del volcán El Chichón. En una primera etapa se realizó el aislamiento y la identificación molecular de la cepa VCA3 mediante la amplificación del gen 16S rRNA por PCR de punto final. Posteriormente, se realizaron pruebas bioquímicas y de confrontación dual para evidenciar el potencial de biocontrol de la cepa nativa extremófila VCA3. Los resultados demostraron que la cepa *Brevibacillus* sp. VCA3 tuvo la capacidad de inhibir de manera significativa el crecimiento de diversos hongos fitopatógenos. Estos resultados respaldan el potencial de esta cepa en el biocontrol de fitopatógenos para mejorar los estándares de calidad actuales de los procesos de producción agrícola sostenible.

Palabras clave: Aislamiento, termófilo, agente de biocontrol, volcán Chichonal.

INTRODUCCIÓN

La diversidad y abundancia de organismos presentes en nuestro planeta está constituida en su mayoría por microorganismos (Romero, 2021). Se han reportado aproximadamente 30,800 géneros de protozoarios, 70,000 especies de hongos y 45,000 especies de bacterias. No obstante, ambientes como el suelo contienen una amplia diversidad de microorganismos como protozoarios, cianobacterias, bacterias y hongos, en donde se estima que existen poblaciones de especies de 100 a 2,000 millones de individuos por cada gramo de suelo (Schultz & Rosado, 2020), en donde se han identificado 35,000 especies de bacterias y 1.5 millones de especies de hongos aproximadamente, aunque se estima que solo se han identificado entre un 8% y un 1% respectivamente. Esto sugiere que otros hábitats dentro de cada ecosistema del planeta pueden albergar una diversidad y abundancia microbiana que todavía no ha sido explorada (Martínez-Espinoza, 2020).

En este contexto, diversos estudios sobre las comunidades microbianas se basan en la capacidad que tienen para adaptarse a múltiples condiciones de ambientes que son denominados ecosistemas extremos, los



cuales presentan condiciones que se encuentran fuera de los rangos considerados como normales. Estos microorganismos se denominan extremófilos y dentro de este grupo se encuentran los termófilos, los cuales son capaces de adaptarse y sobrevivir a altas temperaturas. Dichos microorganismos se han aislado de fuentes geotermales, áreas volcánicas, fumarolas y sistemas hidrotermales (Schiraldi et al. 2020). Reportes como el de Peña-Ocaña et al. (2020) describen el lago-cráter del volcán El Chichón, un ecosistema extremo ubicado en el Estado de Chiapas, considerado una fuente de biodiversidad microbiana, los cuales son capaces de tolerar condiciones específicas en ambientes que no han sido estudiados. Diversas investigaciones realizadas en este sitio volcánico se basan en la composición química del lago cráter mediante el monitoreo hidrogeoquímico, mostrando índices de acidez altos en el agua, con un rango de pH de 2 a 3, teniendo dos aportes principales: aguas hidrotermales y gases con H_2O , la cual confiere características extremas al lago del volcán El Chichón (Armienta, et al., 2014).

Por otra parte, existen estudios relacionados con la presencia de vegetación primaria, como son las plantas pioneras, las cuales facilitan el establecimiento de plántulas de diversas especies a los alrededores de El Chichón, generando condiciones ambientales favorables para la vida microbiana. Dentro de estas investigaciones, existen reportes previos de los microorganismos presentes en ambientes volcánicos y el papel que juegan en el desarrollo de nuevas investigaciones biotecnológicas, debido a que estos microorganismos son capaces de enzimas alcalinas extracelulares, producir fitohormonas, solubilizar fosfatos y tener propiedades como controladores de fitopatógenos (Rincón-Molina et al., 2020). De igual manera, un estudio realizado por Rincón-Molina et al. (2018) reportaron la presencia de microorganismos capaces de habitar en sedimentos volcánicos de El Chichón, además de que el índice de acidez encontrado fue ligeramente ácido, la concentración de metales pesados fue alta, en donde se destacó la presencia de molibdeno y vanadio, destacando la participación de estos compuestos en procesos bacterianos bioquímicos y metabólicos. Un análisis previo relacionado con la identificación de bacterias termófilas aisladas de sedimento y agua del lago-cráter del volcán El Chichón, fue el realizado por Martínez-López et al. (2023), en donde demostraron la presencia de una bacteria termófila perteneciente al género de *Paenibacillus*, en donde se identificó su genoma completo y se demostró que tiene la capacidad de producir metabolitos y además de que presenta genes que están relacionados con la promoción del crecimiento vegetal y el control de fitopatógenos.

En México existe una gran demanda de producción de alimentos, sin embargo, la utilización excesiva de productos químicos que se emplean para el crecimiento y el control de fitopatógenos causa afectaciones en los cultivos y sus derivados, así como grandes efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, cambiando las propiedades fisicoquímicas del suelo y alterando la composición de las comunidades microbianas benéficas (Referencia). Es por ello que existe la necesidad de estudiar nuevas alternativas para la disminución del uso de químicos, dando paso al uso de microorganismos extremos en la agricultura. Por lo anteriormente mencionado, en esta investigación se identificó y evaluó la cepa nativa extremófila *Brevibacillus* sp. VCA3 como un agente de biocontrol contra hongos fitopatógenos de interés agrícola y comercial.



MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento de la cepa *Brevibacillus* sp. VCA3

Para el aislamiento de la cepa, se recolectaron muestras de sedimento de la capa superficial y perimetral del lago del volcán El Chichón a 81 °C. Primeramente, se tomó 1g de sedimento y se colocó en 10 mL de agua volcánica (del mismo punto de recolección de los sedimentos) y se mantuvo en agitación a 120 rpm durante 12 h a 50 °C. Para la preparación de los cultivos bacterianos, se inoculó 1 mL de la suspensión en 10 mL de medio líquido LB (Luria Bertani) y se incubó a 50 °C durante 72 h. Los aislados fueron seleccionados mediante la diversidad morfológica de sus colonias. El aislamiento de la cepa VCA3 se realizó en agar LB mediante la técnica de estría cruzada hasta obtener un cultivo puro (Martínez-López et al., 2023).

Caracterización morfológica

Se realizó la caracterización morfológica de *Brevibacillus* sp. VCA3, ya que es de suma importancia para iniciar la identificación preliminar de cada cepa aislada. La descripción de identificación de la cepa bacteriana VCA 3 se llevó a cabo mediante observación en placa, considerando características morfológicas macroscópicas como el tamaño, superficie, consistencia, morfología y color/pigmentación.

Tinción de Gram

La tinción de Gram se realiza con el propósito de estudiar y clasificar la bacteria *Brevibacillus* sp. VCA3 para poder lograr una prueba de identificación de la cepa nativa de acuerdo con la metodología reportada por Martínez-López & Ruíz-Valdiviezo (2019). Para el procedimiento de identificación microscópica de la cepa bacteriana, se realizó una toma directa de la cepa VCA3 que se colocó en un portaobjetos de vidrio que contiene de 1 a 2 gotas de agua destilada. Previamente, se procedió a homogenizar la muestra con movimientos circulares hasta formar una mancha delgada, por último, la muestra se fija pasándola 3 veces cerca de la llama del mechero, cuidando que la muestra no se sobrecalentara. Una vez realizada la fijación de la bacteria en el portaobjetos de vidrio, se prosiguió a realizar la tinción de Gram con las soluciones que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Soluciones para la tinción de Gram

Solución	Tiempo	Grampositivas	Gramnegativas
Colorante	2 min	Violeta	Violeta
Mordiente: Lugol	2 min	Violeta	Violeta
Decolorante: Alcohol-cetona	10 s	Violeta	Incolora
Colorante de contraste: Safranina	1 min	Violeta	Rosada



Extracción de ADN genómico

La cepa fue reactivada en medio LB a 45 °C durante 48 h para su posterior extracción de DNA genómico que se realizó empleando el kit comercial ComercialZR Fungal/Bacterial DNA MiniPrep™ (ZYMO RESEARCH) de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Determinación de la calidad y cantidad de DNA genómico

La calidad del DNA extraído se comprobó utilizando un gel de agarosa al 1%. Los pozos del gel fueron cargados con 3 µL de marcador de peso molecular GeneRuler™ 1Kb Plus DNA (Thermo Scientific™) y 3 µL del DNA extraído, adicionando 2 µL de buffer de carga SYBR Green™ (Thermo Fisher Scientific) en todos los pozos cargados. Continuamente, las muestras de DNA fueron separadas sumergiendo el gel en una solución de TAE 1X dentro de una cámara de electroforesis (SIGMA-ALDRICH®). Las condiciones de corrida fueron 90 voltios, 400 mA, durante 30 minutos con una fuente de alimentación Power PAC300 (BIO-RAD®); posteriormente, la cuantificación de la cantidad de DNA extraído se realizó con ayuda de un espectrofotómetro de UV visible NanoDrop™ One UV-Vis (Thermo Scientific™).

Amplificación del gen 16S rRNA mediante la técnica de PCR de punto final

La amplificación del gen 16S rRNA se realizó empleando los oligos 27F (5'-AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG-3') y 1492R (5'-GTT TAC CTT GTT ACG ACT T-3'), los cuales son característicos para la amplificación a 1540 pb aproximadamente. El volumen total de reacción de PCR fue de 50 µL. Para preparar la reacción de PCR, se agregó 5 µL de Buffer 10X, 1.5 µL MgCl₂ al 50 mM (Invitrogen™), 0.5 µL de primer 27F y 1492R (T4OLIGO®), 0.4 µL de un mix con dNTP's al 2.5 mM c/u (Thermo Scientific™), 0.25 µL de Taq polimerasa al 5 U/µL (Invitrogen™), 1 µL de DNA y 40.85 µL de H₂O libre de nucleasas (Thermo Scientific™). El programa utilizado para amplificar el gen se muestra en la figura 1, utilizando un termociclador Mastercycler (Eppendorf®). Los productos de amplificación fueron revelados en un gel de agarosa al 1% que contenía 2 µL de marcador de peso molecular GeneRuler™ 1Kb Plus DNA (Thermo Scientific™) y 2 µL de las reacciones amplificadas, adicionando 2 µL de buffer de carga SYBR Green™ (Thermo Fisher Scientific) a cada uno de los pozos del gel cargados. Las muestras corridas en el gel fueron sumergidas en una solución de TAE 1X dentro de una cámara de electroforesis (SIGMA-ALDRICH®). Las condiciones fueron 90 voltios, 400 mA, durante 33 minutos con una fuente de alimentación Power PAC300 (BIO-RAD®); posteriormente, la calidad de las bandas obtenidas en el gel se reveló en un transiluminador UV Transilluminator 2000 (BIO-RAD®), mientras que la cuantificación de los amplicones obtenidos se realizó con ayuda de un espectrofotómetro de UV visible NanoDrop™ One UV-Vis (Thermo Scientific™). (Martínez-López & Ruíz-Valdiviezo, 2019).

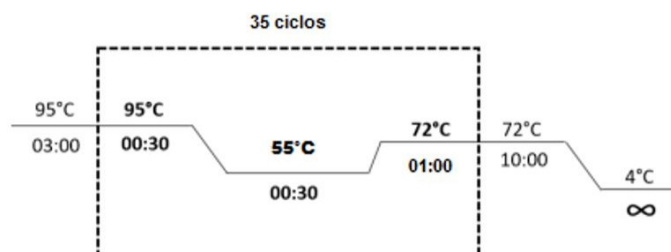


Figura 1. Programa de PCR utilizado para la amplificación del gen 16S rRNA.

Secuenciamiento y análisis bioinformático de la cepa *Brevibacillus* sp. VCA 3

La secuenciación de las amplificaciones de los productos de PCR (forward y reverse) se llevó a cabo con el método de capilaridad de SANGER en la empresa MacroGen ubicada en Seúl, República de Corea del Sur. Una vez obtenida la secuencia, se utilizó el software FichTV para observar la calidad de las secuencias obtenidas, esto en busca de que los electroferogramas tuvieran señales definidas. Para realizar el alineamiento y purificación de las secuencias, se utilizó el software SeaView. Para llevar a cabo la asignación taxonómica, se utilizó la herramienta del BLAST del National Center for Biotechnology Information (NCBI). Por último, para construir el árbol filogenético se utilizó el programa de MEGA X (López., 2019).

Evaluación *in vitro* de la capacidad antagónica de la cepa VCA3 contra hongos fitopatógenos.

Para esta prueba antagónica se utilizó la cepa *Colletotrichum gloeosporioides*, la cual fue colectada de frutos infectados de mango. Estas cepas fueron proporcionadas por el laboratorio de Fitopatología del INIFAP, ubicado en Ocozacoautla, a cargo del Dr. Eduardo Raymundo Garrido Ramírez. Los parámetros para la conservación de la cepa *Colletotrichum* fueron una incubación a 28°C durante 7 días. Por consiguiente, la cepa *Fusarium oxysporum* fue aislada de plantas de chile infectadas, proporcionada por el Laboratorio de Fisiología Vegetal del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, a cargo de la Dra. Nancy Ruiz Lau. La cepa *Fusarium* fue incubada a 28°C durante 4 días. Posteriormente, se cortaron discos fúngicos de 0.6 cm de diámetro y se colocaron a 15 mm de distancia del borde de una caja de Petri con medio sólido PDA (Agar Papa y Dextrosa) (DIBICO®). La cepa de VCA 3 fue sembrada por estría simple a una distancia de la posición del disco fúngico. Los cultivos fueron incubados a una temperatura de 28°C durante el tiempo de crecimiento de acuerdo con los parámetros determinados anteriormente del respectivo hongo empleado en cada prueba. Todas las confrontaciones fueron realizadas por duplicado, el crecimiento radial se determinó como la tasa de inhibición.

$$\text{Tasa de inhibición (\%)} = \left[\frac{R_c - R_t}{R_c} \right] \times 100 \%$$

Donde R_c es el crecimiento radial del hongo control y R_t es el crecimiento radial del hongo desde la posición del disco fúngico (Kim et al., 2020).

Determinación de la actividad de biosurfactante de la cepa VCA 3

Para realizar la determinación de esta actividad biosurfactante, en primer lugar, se añadió 0.5 mL del extracto de cultivo, 7.5 mL de buffer que contenía 20 mM de Tris-HCl (J.T. Baker®) y 10 mM de MgSO_4

(J.T. Baker®) y 0.1 mL de oliva y soja respectivamente para cada experimento en un tubo de vidrio de 13x100 mm (PYREX®)2. Por consiguiente, se agitó durante 1 min en un agitador Vortex-Genie II Mixer SI-0236 (Scientific Industries) y se dejó reposar durante una hora a 30 °C. Por último, la cantidad de emulsionante se determinó midiendo la absorbancia de la mezcla contenida en cada tubo a una longitud de onda de 540 nm con un espectrofotómetro VE 5600 UV-A11807003 (VELAB®). El ensayo fue realizado por triplicado, incluyendo el control que contenía caldo LB sin inocular (Méndez-Trujillo et al., 2016).

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos de confrontación y actividad biosurfactante, se sometieron a un análisis estadístico en donde se presentó su valor medio y su desviación estándar. Para comparar las diferencias entre las medias, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando la prueba de Tukey con ayuda del software Statgraphics Centurion XVII con un 95 % de confiabilidad y una diferencia estadística significativa a $p \leq 0.05$ (Kaur et al., 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aislamiento de la cepa *Brevibacillus* sp. VCA3

La cepa bacteriana VCA3 fue aislada a partir de muestras recolectadas del volcán El Chichón, Chiapas, México. Tras la incubación en medio nutritivo sólido durante 48 h a 45°C, se obtuvo un crecimiento uniforme de colonias con características fenotípicas distintivas. La morfología colonial de la cepa VCA3 presentó una forma circular de color beige, con bordes regulares y redondeados, superficie plana y una consistencia cremosa (Figura 2).

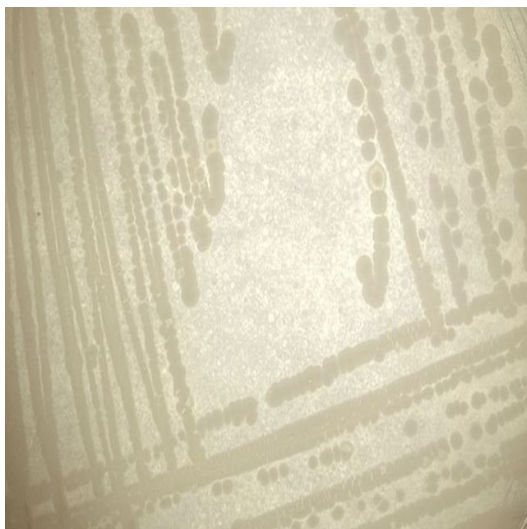


Figura 2. Morfología de las colonias formadas por la cepa VCA3 reactivada en medio LB.

Desde una perspectiva comparativa, este tipo de morfología fue similar a lo reportado previamente en especies del género *Brevibacillus* por Layton & Maldonado (2011), quienes aislaron la cepa *Brevibacillus* sp. G12 obtenida de raíces de nopal cultivado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en



Saltillo, Coahuila, México. Dicho ecosistema fue considerado extremo debido a las condiciones fisicoquímicas que se necesitan para la supervivencia de estos microorganismos. Ellos encontraron que la cepa G12 presentó morfologías de colonias blanquecinas, grandes, extendidas e irregulares, de consistencia cremosa. En este contexto, los resultados demuestran que las diferentes especies del género *Brevibacillus* que han sido aisladas de ecosistemas extremos, comparten ciertas características morfológicas predominantes, como el color y consistencia que presentan cuando son sembradas en medios de cultivo sólidos.

Por otro lado, las observaciones fenotípicas a nivel microscópico de la cepa VCA3 revelaron estructuras cocoides de forma puntiforme. La prueba de tinción de Gram mostró un color azul característico, lo que confirma que se trata de una bacteria Gram positiva (Figura 3).

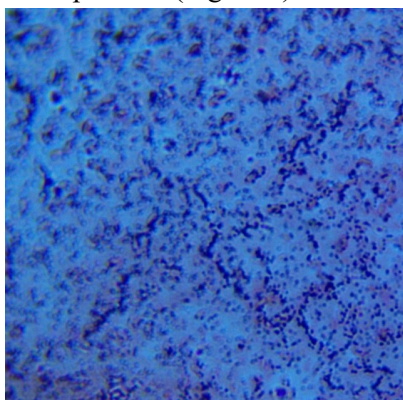


Figura 3. Tinción de Gram positiva de la cepa VCA3 aislada del lago cráter del volcán El Chichón.

Extracción del DNA genómico y amplificación del gen 16S rRNA de la cepa VCA3

Posteriormente a la reactivación de la cepa, se realizó la extracción de DNA, cuyos resultados fueron evaluados mediante una electroforesis en gel de agarosa al 1%. En la Figura 4 se puede observar la presencia de bandas definidas, claras e intensas, demostrando una buena calidad de DNA. De acuerdo con el marcador del peso molecular utilizado (GenerRuler™ 1Kb plus DNA Ladder), se estimó un tamaño molecular aproximado de 20 000 pb.

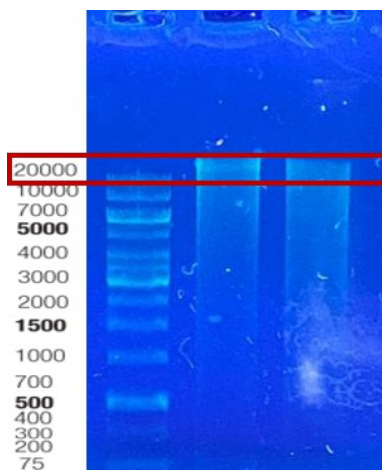


Figura 4. DNA revelado en gel de agarosa. Orden de las muestras: 1: marcador molecular 1 Kb plus; 2 y 3: DNA de la cepa VCA3.

Seguido de obtener su cantidad, se cuantificó la concentración y calidad de DNA obtenido, encontrándose valores adecuados para su secuenciamiento. Con base a las especificaciones del fabricante (Thermo Scientific, 2016) de espectrofotómetro NanoDrop One/One UV-Vis, se reporta que un índice de absorbancia A260/A280 cercano a 1.8, se considera un indicativo de alta pureza, al reflejar la ausencia de contaminantes como RNA, proteínas o enzimas. En este estudio, la concentración de DNA de la cepa VCA3 fue de 96.70 ± 5.6 ng/ μ L y una relación A260/A280 de 1.89 ± 0.01 , confirmando su calidad apropiada para análisis moleculares posteriores.

Amplificación y secuenciamiento del gen 16S rRNA de la cepa VCA3

Con la calidad de DNA, se realizó la amplificación para el gen 16S rRNA. El análisis mediante la electroforesis en gel de agarosa al 1% mostró una banda de aproximadamente 1,500 pb, correspondiente al tamaño esperado para este marcador molecular (Figura 5).

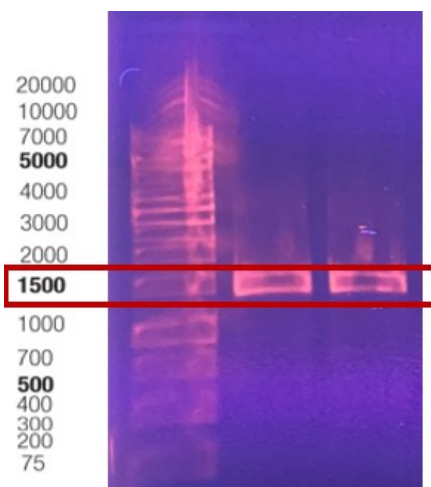


Figura 5. Amplificación del gen 16S rRNA revelado en gel de agarosa. Orden de las muestras: 1: Kb plus y 2: amplicón del gen 16S rRNA de VCA3.

Un estudio realizado por Coenye & Vandamm, (2023) reportaron que el gen 16S ha demostrado ser de gran utilidad para describir y caracterizar las comunidades microbianas, debido a que su secuencia se encuentra altamente conservada entre las distintas especies de bacterias y arqueas. El ARNr 16S es un polirribonucleótido de aproximadamente 1500 nucleótidos codificado por el gen *rrs*, también denominado ADN ribosomal 16S. Esta molécula ha sido reconocida como un poderoso marcador universal debido a que se encuentra en todos los organismos conocidos (Rodicio & Mendoza, 2004). Por otro lado, la calidad y cantidad del producto amplificado se cuantificó con el espectrofotómetro NanoDrop One/One Uv-vis, encontrando que la concentración de 35.80 ng/μL y la calidad A260/A280 de 1.75, valores aceptables para su secuenciamiento.

Posteriormente, el análisis comparativo de la secuencia del 16S rRNA de la cepa aislada VCA3 se realizó mediante la herramienta BLAST perteneciente al NCBI para su asignación taxonómica. Los resultados mostraron que la mayoría de las cepas aisladas hasta la actualidad pertenecen al género *Brevibacillus* (Figura 6), obteniéndose una similitud del 96.58% de identidad con *Brevibacillus formosus* strain SR4-23.

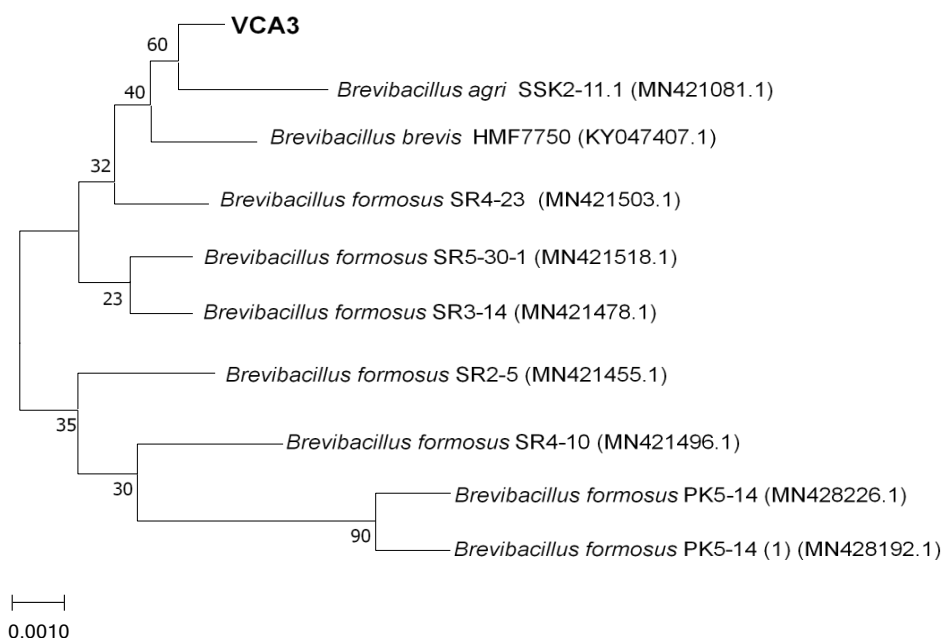


Figura 6. Árbol filogenético de la cepa VCA 3 aislada del lago cráter del volcán El Chichón.

La importancia del género *Brevibacillus* está confirmada por diversas investigaciones científicas y catálogos comerciales de proteínas recombinantes heterólogas. *Brevibacillus* es una de las bacterias grampositivas más comunes reportadas en diferentes entornos ecológicos. Las altas tasas de crecimiento, la eficiencia de transformación mejorada mediante electroporación, la producción de pequeñas cantidades de proteasas extracelulares y la expresión constitutiva de proteínas heterólogas, lo que lo convierte en un excelente modelo de laboratorio. En términos de aplicaciones biotecnológicas, este género continúa siendo

una fuente de interés debido a la capacidad que tienen sus enzimas para biodegradar polietileno de baja densidad y su capacidad para actuar como agente de control biológico.

En este contexto, Meena *et al.* (2014) reportaron el aislamiento y caracterización de la cepa *Brevibacillus formosus*, siendo esta capaz de producir un alto nivel de quitinasa, de los suelos del Gran Desierto de la India, donde la temperatura oscila entre -4°C y 52.8°C . Los resultados reportados muestran que la enzima producida por *Brevibacillus formosus* se encontró termoestable a temperaturas más altas y mostró una tasa de crecimiento de más de 5 h a 100°C , donde el peso molecular estimado de la enzima purificada fue de 37.6 kDa. Un ejemplo claro sobre el uso biotecnológico de estas bacterias se relaciona con diversos estudios sobre el polietileno, debido a que este tiende a ser difícil de degradar naturalmente en el medio ambiente, por lo que se convierte en uno de los residuos que requieren un manejo especial en el proceso de gestión. Un análisis molecular del género *Brevibacillus brevis* reportado por Rozana *et al.* (2023) indicó que este género tiene la capacidad de degradar el polietileno, debido a que tiene buenas habilidades de supervivencia bajo estrés y falta de nutrientes, lo que refuerza su relevancia ambiental y biotecnológica.

Capacidad antifúngica de la cepa VCA3

Los análisis a nivel *in vitro* confirmaron la efectividad y la capacidad que presenta la cepa VCA 3 para inhibir fitopatógenos de interés agrícola. En particular, se evaluó su capacidad de inhibición contra el hongo *Colletotrichum gloesporioides*. La actividad antifúngica fue representada mediante la medición de la tasa de inhibición (%) y el diámetro de crecimiento micelial (cm), comparando el tratamiento control con el tratamiento por confrontación. En las Figuras 7, 8 y 9 se pueden observar los resultados de la actividad antifúngica de la cepa VCA3 contra diferentes cepas del hongo.

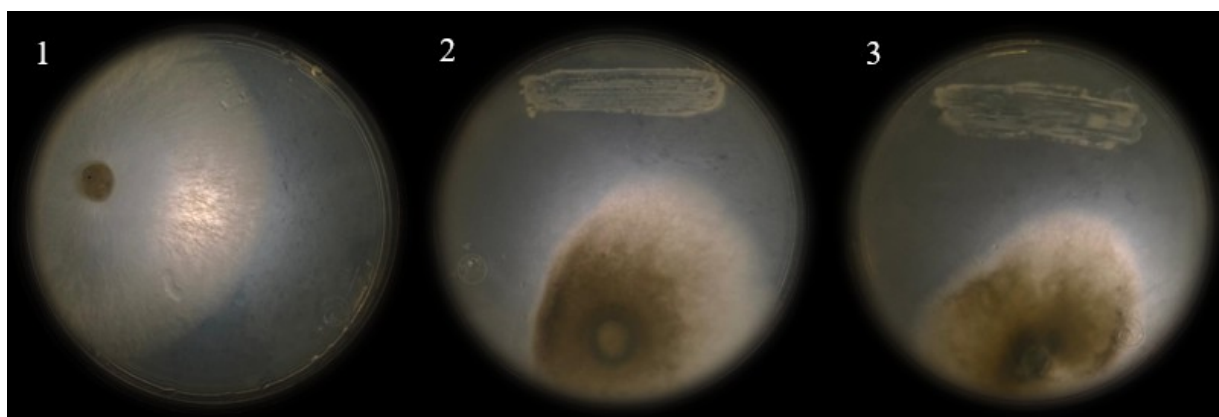


Figura 7. Confrontación dual de *Brevibacillus* sp. VCA3 contra *Colletotrichum gloesporioides*: 1) *Colletotrichum gloesporioides* 6511 control; 2 y 3) *Colletotrichum gloesporioides* 6511 + VCA3

En la Tabla 2, se observa que la cepa VCA3 presentó un 24.04% de inhibición frente a *Collectotrichum gloesporioides* 6511 y, comparado con el control, se tuvo una diferencia estadística significativa, evidenciando que la presencia de la bacteria extremófila VCA3 limitó el crecimiento del hongo.

Estos datos son similares a los reportados por Miljaković et al. (2020) donde obtiene un porcentaje de inhibición de 69.1% en confrontación con *Bacillus firmus* a las 96 h; por su parte, Ruiz-Sanchez (2014) obtuvo un valor de inhibición de 63 a 80% de inhibición por la cepa *Bacillus subtilis*. Adicionalmente, diversos estudios han reportado que las cepas pertenecientes al género *Bacillus* sp. producen lipopéptidos cíclicos como son surfactina, iturina A y fengicina, los cuales se asocian a la formación de las zonas de inhibición cuando existe el enfrentamiento de los antagonistas contra el fitopatógeno (Salas, 2015).

Tabla 2. Tasa de inhibición de *Brevibacillus* sp. VCA 3 contra *Collectotrichum gloesporioides* 6511.

Cepa fúngica 6511		
Tratamientos	Diámetro del hongo (cm)	Tasa de inhibición (%)
Control <i>Colletotrichum</i> sp.	5.2 ± 0 a	0 ± 0 a
VCA3 vs <i>Colletotrichum</i> sp.	3.95 ± 0.35355 b	24.04 ± 6.80237 b
DMS	1.07566	

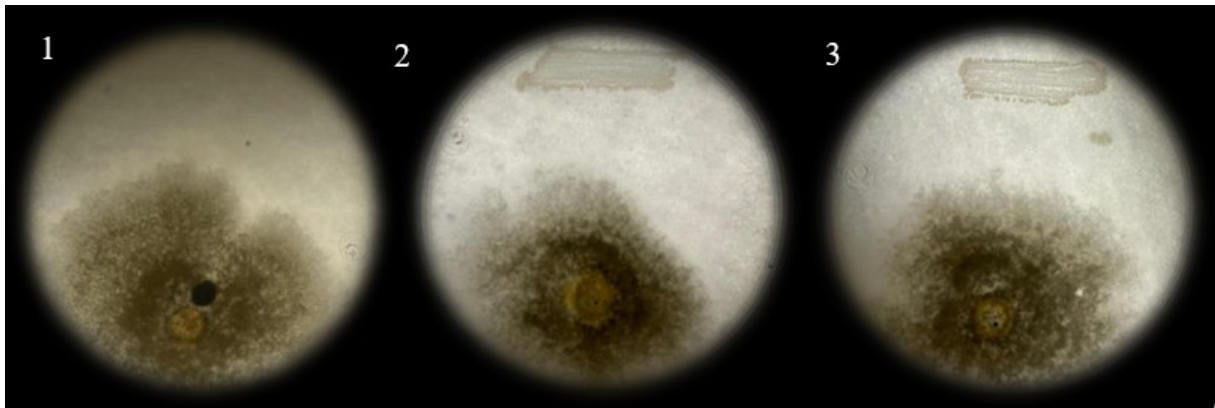


Figura 8. Confrontación dual de *Brevibacillus* sp. VCA3 contra *Collectotrichum gloesporioides*: 1) *Collectotrichum gloesporioides* 6531 control; 2 y 3) *Collectotrichum gloesporioides* 6531 + VCA3

En la Tabla 3 se reporta el porcentaje de inhibición de la cepa *Collectotrichum gloesporioides* 6531 con un valor de 11.54% de actividad antifúngica de la cepa VCA3. De manera general, se puede observar en la Figura 8, una diferencia de crecimiento de la cepa VCA3 en comparación con el tratamiento control, confirmando de forma macroscópica que existe menos esporas en el tratamiento 2 y 3.

Sawar et al. (2018) realizaron un estudio sobre el potencial de control biológico de bacterias antagonistas, con los géneros *Collectotrichum gloesporioides*, *Collectotrichum capsici*, y *Collectotrichum* sp. Identificaron que 9 bacterias del género *Bacillus* mostraban potencial antagonista, dentro de estas se destacan *Bacillus subtilis* y *Bacillus amyloliquefaciens* obtuvieron una mejor actividad antifúngica contra *Collectotrichum* con un valor de 61.8%. El género *Bacillus* tiene un papel muy importante en la sanidad vegetal; estimulando el crecimiento y protección contra microorganismos fitopatógenos, y está ampliamente relacionado con la producción de metabolitos secundarios (Villarreal-Delgado et al., 2018).

Tabla 3. Tasa de inhibición de la actividad antifúngica de *Brevibacillus* sp. VCA 3 contra el hongo fitopatógeno *Collectotrichum gloesporioides* 6531.

Cepa fúngica 6531		
Tratamientos	Diámetro del hongo (cm)	Tasa de inhibición (%)
Control <i>Colletotrichum</i> sp.	5.2 ± 0 a	0 ± 0 a
VCA3 vs <i>Colletotrichum</i> sp.	4.6 ± 0.141421 b	11.54 ± 2.71529 b
DMS	8.26109	

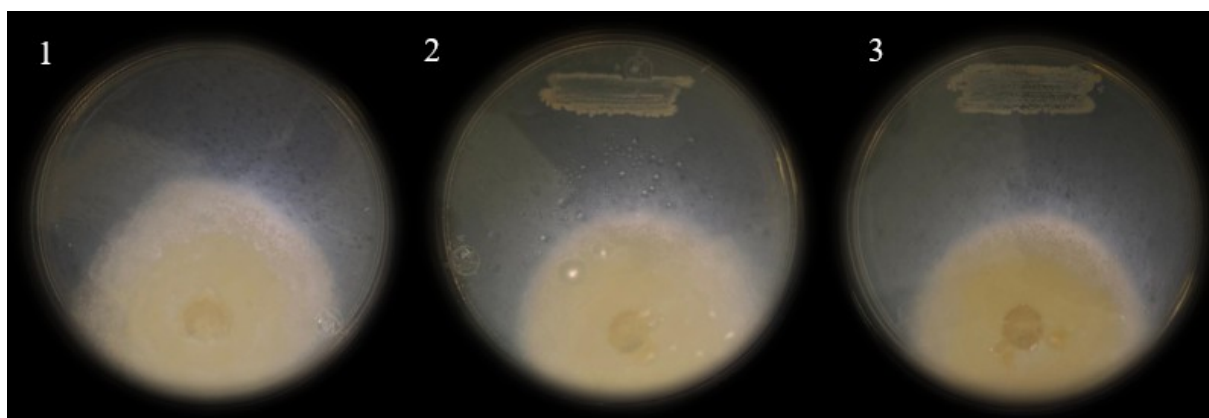


Figura 9. Confrontación dual de *Brevibacillus* sp. VCA3 contra *Colletotrichum gloesporioides*: 1) *Colletotrichum gloesporioides* 6533 control; 2 y 3) *Colletotrichum gloesporioides* 6533 + VCA3.

En la Tabla 4 se muestra que la cepa VCA3 presentó una tasa de inhibición de la actividad antifúngica con un porcentaje de 19.0 % frente al fitopatógeno *Colletotrichum gloesporioides* 6533. Este valor fue similar a lo reportado por Ruiz-Sánchez et al., (2014), quienes obtuvieron un valor de inhibición de crecimiento micelial del fitopatógeno *Colletotrichum gloesporioides* con los filtrados bacterianos del género *Bacillus licheniformis* y *Bacillus subtilis*, obteniendo un porcentaje entre 13.2 y 42.8 %.

Existen reportes sobre las capacidades antifúngicas que tienen diferentes especies del género *Bacillus*, y su posible mecanismo contra *Colletotrichum gloesporioides*, que causa la antracnosis del mango. Por ejemplo, Veras et al. (2016) reportaron pruebas con cepas del género *Bacillus* aisladas del medio acuático de la región amazónica brasileña para determinar su actividad antifúngica contra hongos micotoxigénicos; entre estos se estudiaron especies como *Aspergillus* spp. Los resultados demostraron que cuatro cepas de *Bacillus* presentan tasas de inhibición prometedoras por su actividad para reducir la tasa de crecimiento micelial, la esporulación y el porcentaje de germinación de esporas. La bacteria *Bacillus* P11 influyó en la producción de micotoxinas, provocando una reducción de alrededor del 99 y 97 % en la concentración de las colonias de hongos, incluida una inhibición completa de ocratoxina, indicando que estas cepas bacterianas podrían ser agentes de biocontrol prometedores contra hongos toxigénicos, causantes de grandes pérdidas en la agricultura en México.



Tabla 4. Tasa de inhibición de la actividad antifúngica de *Brevibacillus* sp. VCA 3 contra el hongo fitopatógeno *Colletotrichum gloesporioides* 6533.

Cepa fúngica 6533		
Tratamientos	Diámetro del hongo (cm)	Tasa de inhibición (%)
Control <i>Colletotrichum</i> sp.	5.0 ± 0 a	0 ± 0 a
VCA3 vs <i>Colletotrichum</i> sp.	4.05 ± 0.0707107 b	19.0 ± 1.41421 b
DMS	4.30265	

Actividad biosurfactante de la cepa VCA3

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la evaluación de la actividad biosurfactante de la cepa VCA3. Se observó una diferencia estadística significativa comparada con la prueba control de los tratamientos. Los valores obtenidos por medio de la absorbancia a $\lambda=540$ nm para la emulsificación son mayores comparados con el control para ambos tratamientos evaluados. Sin embargo, en los ensayos de dispersión del aceite de oliva / VCA 3 y aceite de soja / VCA 3 se obtuvieron valores bajos o negativos, lo que sugiere la ausencia de actividad surfactante. En consecuencia, no se evidenció reducción de la tensión en la interfaz ni incremento en la solubilidad del aceite en agua.

Tabla 5. Actividad biosurfactante producida por *Brevibacillus* sp. VCA 3 con diferentes tipos de aceites.

Absorbancia a $\lambda=540$ nm en diferentes tipos de aceites		
Tratamientos	Aceite de oliva	Aceite de soja
Control	0.086 ± 0.0236 a	0.072 ± 0.0305 a
Cepa VCA3	0.189 ± 0.0367 b	0.254 ± 0.0527 b
DMS	0.07044	0.09758

Con respecto a la evaluación de la cepa VCA3, esta considera una evaluación semicuantitativa empleada para la determinación de la actividad biosurfactante, ya que se ha encontrado que existe una correspondencia directa entre esta y la capacidad de emulsificación. Sin embargo, diferentes autores afirman que la capacidad emulsionante no siempre está directamente relacionada con la actividad superficial del compuesto (Moreno, 2018).

El uso de tensoactivos en la vida diaria, y en las extensas áreas de industrias es inevitable, y su liberación al medio ambiente, especialmente a las masas de agua en forma de aguas residuales. Estos productos son responsables de la formación de espuma en los cuerpos de agua y causan diversos efectos adversos a los componentes bióticos y abióticos del ecosistema. Asimismo, los tensoactivos tienen la capacidad de romper la membrana celular y, por tanto, provocar toxicidad en los organismos vivos Arora et al. (2022).

CONCLUSIONES



El análisis filogenético de muestras de sedimentos del lago del volcán El Chichón permitió identificar a la cepa aislada VCA3 como perteneciente al género de *Brevibacillus*, con un 96.58 % de similitud con la cepa *Brevibacillus formosus* SR4-23. Así mismo, en los análisis de biocontrol de fitopatógenos de interés agrícola, se demostró que la cepa VCA3 tiene actividad antifúngica con un valor del 24 % contra *Colletotrichum gloeosporioides*, valor que corresponde a un nivel de inhibición media. Lo cual da una pauta al potencial contra hongos fitopatógenos, por lo que se recomienda ampliar estudios a nivel *in vitro* y a nivel de campo de esta actividad antifúngica. Cabe destacar que algunas bacterias extremófilas generan interés en el uso en los ámbitos industriales y ambientales. Aunque actualmente, muchas empresas dudan de su potencial y prefieren el uso de herramientas tradicionales como los compuestos químicos, las investigaciones que se han generado de estos microorganismos sugieren que su uso es una posible sustitución de estos compuestos químicos, lo cual trae beneficios tanto en el medio ambiente como en la salud humana, al reducir la dependencia de productos químicos potencialmente dañinos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Gobierno de México (SECIHTI), por la beca de doctorado otorgada a Nancy Abril Martínez-López (número 998226) y al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por el apoyo financiero de proyecto clave:22847.25-P.

REFERENCIAS

- Armienta, M.A, De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, S., Cruz, O., Aguayo, A., Arcega-Cabrera, F. (2014). Hydrogeochemical surveillance at El Chichón volcano crater lake, Chiapas, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, pp. 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores>
- Coenye, T., & Vandamme, P. (2023). Intragenomic heterogeneity between multiple 16S ribosomal RNA operons in sequenced bacterial genomes. *FEMS MICROBIOLOGY*, 45-9. <https://academic.oup.com/femsle/article/228/1/45/571392?login=false>
- Kaur, T., Rani, R., & Manhas, R. K. (2019). Biocontrol and plant growth promoting potential of phylogenetically new *Streptomyces* sp. MR14 of rhizospheric origin. *AMB Express*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0849-7>
- Kennis, R., Sitoresmi, P., Dimas, W. (2023). Distribution and biodegradation analysis of polyvinyl chloride microplastic by indigenous bacteria isolated from Supit Urang Landfill, Malang, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 24. 10.13057/biodiv/d240724.
- Kim, J., Le, K. D., Yu, N. H., Kim, J. Il, Kim, J. C., & Lee, C. W. (2020). Structure and antifungal activity of pelgipeptins from *Paenibacillus elgii* against phytopathogenic fungi. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 163, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.11.009>
- Layton, C., & Maldonado, E. (2011, Noviembre). *Bacillus* spp.; perspectiva de su efecto biocontrolador mediante antibiosis en cultivos afectados por fitopatógenos. *Universidad Colegio Mayor de*



Cundinamarca,

179.

file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Bacillus_spp_perspectiva_de_su_efecto_biocontrolad.pdf

- Martínez-Espinosa, R. M. (2020). Microorganisms and their metabolic capabilities in the context of the biogeochemical nitrogen cycle at extreme environments. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ijms21124228>
- Martínez-López, N. A., Peña-ocaña, B. A., García-contreras, R., Maeda, T., Rincón-rosales, R., Cazares, A., Hoshiko, Y., & Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2023). Complete genome sequence of *Paenibacillus* sp. VCA1 isolated from crater lake of the El Chichón Volcano. *Microbiology Resource Announcements*, 12(11), 2–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1128/MRA.00583-23>
- Méndez-Trujillo, V., Carrillo Beltrán, M., Valdez-Salas, B., & Gonzalez-Mendoza, D. (2016). Bacteria with capacities of production of biosurfactants isolated from native plants of Baja California , México Bacterias con capacidad de producción de biosurfactantes aisladas de plantas nativas de Baja California , México. *International Journal of Experimental Botany*, 9457, 225–230.
- Miljaković, D., Marinković, J., & Balešević-Tubić, S. (2020). The significance of *Bacillus* spp. In disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. *Microorganisms*, 8(7), 1–19. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>
- Peña-Ocaña, B. A., Velázquez-Ríos, I. O., Alcántara-Hernández, R. J., Ovando-Ovando, C. I., Rincón-Rosales, R., Gutiérrez-Miceli, F. A., Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2021). Changes in the Concentration of Trace Elements and Heavy Metals in El Chichón Crater Lake Active Volcano. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1), 295-304. <https://doi.org/10.15244/pjoes/121045>
- Rincón-Molina, C., Garcia, J.A, Rincón-Rosales, R., Gutiérrez-Miceli, F.A., Ramírez-Villanueva, D., González-Terreros, E., Peña-Ocaña, B.A., Palomeque-Domínguez, H., Dendooven, L., Ruíz-Valdiviezo, V.M. (2018). Structure and Diversity of the Bacterial Communities in the Acid and Thermophilic Crater-Lake of the Volcano "El Chichón", Mexico. *Geomicrobiology*. DOI:[10.1080/01490451.2018.1509158](https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1509158)
- Rincón-Molina, C.I., Martínez-Romero, E., Ruiz-Valdiviezo, V. M., Velázquez, E., Ruiz-Lau, N., Rogel-Hernández, M.A., Villalobos-Maldonado, J. J., Rincón-Rosales, R. (2020). Plant growth-promoting potential of bacteria associated to pioneer plants from an active volcanic site of Chiapas (Mexico). *Applied Soil Ecology journal*. 146 (103390). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103390>
- Rodicio, M., & Mendoza, M. (2004). identificación bacteriana mediante secuenciación del ARNr 16S: Fundamento, metodología y aplicaciones en microbiología clínica. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 22: 238 - 245.
- Romero, J. A. (2021). Microorganismos extremófilos. Vida microbiana más allá de sus condiciones óptimas. *Tesis para obtener el título de Doctor en Biología Integrada*, pág. 16. Obtenido de



<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/129955/Delgado%20Romero%2C%20Jos%C3%A9%20Antonio%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Salas, T. V. (2015). DETERMINACIÓN DEL ANTAGONISMO in vitro DE *Bacillus* spp. AISLADO DEL SUELO DE LOS CULTIVOS DE BANANO DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR FRENTE AL HONGO FITOPATOGENO *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense raza tropical 1. *Pontificia Universidad católica del Ecuador*.
- Sarwar, A., Brader, G., Corretto, E., Aleti, G., Abaidullah, M., Sessitsch, A., & Hafeez, F. Y. (2018). Qualitative analysis of biosurfactants from *Bacillus* species exhibiting antifungal activity. *PLoS ONE*, 13(6), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198107>
- Schiraldi, C., Rosa, M. De, & Histology, M. (2020). Encyclopedia of Membranes. Encyclopedia of Membranes. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4>
- Schultz, J., & Rosado, A. S. (2020). Extreme environments: a source of biosurfactants for biotechnological applications. *Extremophiles*, 24(2), 189–206. <https://doi.org/10.1007/s00792-019-01151-2>
- Thermo Scientific. (2016). NanoDrop One - Guía de usuario. *NanoDrop One/One Uv- Vis*. Retrieved from <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/3091-NanoDrop-One-User-Guide-v1.3-sw-SPANISH.pdf>
- Villarreal-Delgado, M. F., Villa-Rodríguez, E. D., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Parra-Cota, F. I., & De los Santos-Villalobos, S. (2018). The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(1), 95–130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>