

Microorganismos edáficos de *Saccharum officinarum*; antagonismo de *Bacillus* spp. contra *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp.

Edaphic microorganisms of *Saccharum officinarum*; antagonism of *Bacillus* spp. against *Colletotrichum* spp. and *Endocalyx* spp.

Karen Jazmín Martínez-Netro¹ , Kevin Eduardo Ríos-Aceves² , Sarahi Rubio-Tinajero¹ ,
José Reyes-Hernández³ , Eduardo Osorio-Hernández^{1*} 

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias, posgrado e investigación. Centro Universitario Victoria, CP. 87149. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

²Universidad Autónoma de Tamaulipas, Secretaría de Investigación y Posgrado. Centro Universitario Victoria, 5to piso centro de gestión del conocimiento, CP. 87149. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Boulevard Enrique Cárdenas González N° 1201, CP. 89840. Ciudad Mante, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: eosorio@docentes.uat.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 21 de marzo 2024

Aceptado: 12 de junio 2025

RESUMEN. Los fitopatógenos son responsables de grandes pérdidas económicas. Sin embargo, existen microorganismos benéficos que actúan como reguladores de patógenos, debido a su efecto antagónico. El objetivo de esta investigación fue aislar e identificar hongos presentes en suelos agrícolas asociados al cultivo de *Saccharum officinarum*, así como evaluar la actividad antifúngica de diversas cepas de *Bacillus* spp., contra *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp. El aislamiento se realizó con la técnica dilución seriada en placa, posteriormente la cuantificación de unidades formadoras de colonias (UFC), la identificación de hongos edáficos a nivel género y la confrontación dual, se evaluó el porcentaje de inhibición y la clasificación de antagonismo. En la cuantificación de UFC de bacterias no se encontró diferencias significativas. Sin embargo, en las UFC de hongos, S4 mostró diferencia significativa comparado con S1. Se identificaron los géneros: *Paecilomyces* spp., *Colletotrichum* spp., *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Endocalyx* spp., *Penicillium* spp., y *Dictyoarthrinium* spp., el suelo que destacó fue S4 (ejido La Rivera, Ocampo, Tamaulipas) con mayor diversidad fúngica. Las cepas evaluadas *B. liquefasciens* (B2), *B. amyloliquefasciens* (B6) y *B. subtilis* (B1) destacaron por su efecto antagónico positivo. B2 contra *Colletotrichum* spp. obtuvo un 83.53%, seguida por B6 contra *Endocalyx* spp. con 81.54%. Aunque B1 mostró porcentajes ligeramente menores (72.08 y 80.24%, respectivamente), fue la única cepa efectiva frente a ambos hongos. En conclusión, S4 destacó por su diversidad fúngica y las cepas B1, B2 y B6 mostraron efecto antagónico positivo, siendo B1 eficaz frente ambos hongos.

Palabras clave: Fitopatógeno, identificación, actividad antifúngica, antagonismo.

ABSTRACT. Phytopathogens are responsible for the greatest economic losses. However, beneficial microorganisms that act as pathogen regulators due to their antagonistic effect. The aim of this research was to isolate and identify fungi present in agricultural soils associated with the cultivation of *Saccharum officinarum*, as well as to evaluate the antifungal activity of various strains of *Bacillus* spp. against *Colletotrichum* spp. and *Endocalyx* spp. The isolation was performed with the serial dilution plate technique, followed by the quantification of colony forming units (CFU), the identification of soil fungi at genus level and the dual confrontation, the percentage of inhibition and the classification of antagonism were evaluated. No significant differences were found in the quantification of bacterial CFU. However, S4 showed a significant difference in fungal CFU compared to S1. The genera *Paecilomyces* spp., *Colletotrichum* spp., *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Endocalyx* spp., *Penicillium* spp. and *Dictyoarthrinium* spp., were identified. The soil that stood out was S4 (ejido La Rivera, Ocampo, Tamaulipas) with the greatest fungal diversity. The strains evaluated, *B. liquefasciens* (B2), *B. amyloliquefasciens* (B6) and *B. subtilis* (B1) stood out for their antagonistic effect. B2 against *Colletotrichum* spp. obtained 83.53%, followed by B6 against *Endocalyx* spp. with 81.54%. Although B1 showed slightly lower percentages (72.08 and 80.24%, respectively), it was the only strain effective against both fungi. In conclusion, soil S4 stood out for its fungal diversity, and strains B1, B2 and B6 showed an antagonistic effect, with B1 being effective against both fungi.

Key words: Phytopathogen, identification, antifungal activity, antagonism.

Como citar: Martínez-Netro KJ, Ríos-Aceves KE, Rubio-Tinajero S, Reyes-Hernández J, Osorio-Hernández E (2025) Microorganismos edáficos de *Saccharum officinarum*; antagonismo de *Bacillus* spp. contra *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(2): e4093. DOI: 10.19136/era.a12n2.4093

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, destacando países como Brasil (558.9 millones de toneladas), India (320.0), China (97.7), Tailandia (74.1), Pakistán (58.6) y México (50.9) (FAO 2024). Sin embargo, la producción se ve amenazada por diversos factores, principalmente bióticos, como son las enfermedades dentro de las cuales destacan los hongos fitopatógenos, provocando pérdidas económicas considerables (Beyari 2025). Además, estos fitopatógenos no solo comprometen el producto final, sino que también disminuyen la competitividad en el mercado y su comercialización (Carbó *et al.* 2021). En el caso específico de *Saccharum officinarum*, se han reportado un aproximado de 160 hongos fitopatógenos, (Viswanathan *et al.* 2020); estos son capaces de reducir hasta en un 31% la producción (Ashwin *et al.* 2020).

Entre los principales agentes fitopatógenos se encuentra *Colletotrichum falcatum*, este hongo causa la enfermedad de la pudrición roja, se multiplica en el tallo y reduce la sacarosa transformándola en alcohol (Silva *et al.* 2024). Como consecuencia, reduce el jugo y el peso de los tallos moledores, además de que, si no se controla, puede ocasionar la pérdida total en esta gramínea (Chaibub *et al.* 2024). Por tal motivo, la principal estrategia de control de los fitopatógenos es mediante agroquímicos como son los fungicidas y bactericidas, pero la aplicación de estos implica daños en el medio ambiente y la salud humana, tanto así que se han recurrido a las restricciones y regulaciones (Almeida *et al.* 2023).

Por lo que se buscan alternativas de control biológico como estrategias sustentables y sostenibles, como el uso de microorganismos benéficos, los cuales han generado mayor importancia en los últimos años, debido a que cuentan con distintos modos de acción como la producción de antimicrobianos, antibióticos naturales y metabolitos secundarios (Nonthakaew *et al.* 2025), además de biorregulación en la microbiota (Compant *et al.* 2025). También tienen rápida capacidad para multiplicarse y ejercer competencia por nutrientes y espacio, y reducen la severidad causada por fitopatógenos (Andrade-Hoyos *et al.* 2023). De acuerdo con la literatura hay un gran número de bacterias benéficas o antagonistas con potencial biocontrolador que regulan la microbiota tanto del suelo como en la parte aérea de las plantas (Tovar *et al.* 2020). Destacando con gran potencial regulador *Pseudomonas* y *Bacillus* (Valenzuela-Ruiz *et al.* 2020), que además inducen al crecimiento vegetal (Slininger *et al.* 2025). Por su parte, *Bacillus* spp., al generar endosporas, se adapta a diversas condiciones climáticas, y produce antibióticos, toxinas, enzimas hidrolasas y lipopéptidos antimicrobianos (Hussain *et al.* 2024). Estos últimos ejercen acciones antifúngica, antibacteriana, antiviral y construyen moléculas que activan mecanismos de resistencia inducida en las plantas (Markelova y Chumak 2025).

En cuanto al hongo *Endocalyx* spp., es un género poco estudiado del que se tiene poca información; sin embargo, Sbaraini *et al.* (2017) detectó compuestos tóxicos relacionados con hongos fitopatógenos. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue aislar e identificar hongos presentes en suelos agrícolas asociados al cultivo de *Saccharum officinarum*, así como evaluar la actividad antifúngica de diversas cepas de *Bacillus* spp., contra *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento y material biológico

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas en Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Las bacterias antagonistas *B. subtilis* (B1), *B. liquefasciens* (B2) y *B. amyloliquefaciens* (B6) fueron proporcionadas por Rubio-Tinajero *et al.* (2021) y Rubio-Tinajero *et al.* (2022).

Obtención de muestras de suelo

El muestreo de suelo se realizó en cinco localidades del Estado de Tamaulipas, México. El suelo 1 (S1) provino del ejido La Taxqueña, municipio de Gómez Farías, mientras que los suelos 2 (S2), 3 (S3), 4 (S4) y 5 (S5) fueron recolectados en los ejidos Las Flores Nuevo, La Muralla, La Rivera y Las Flores Viejo, respectivamente, ubicados en el municipio de Ocampo. Todas las muestras se tomaron en parcelas con cultivos establecidos de *Saccharum officinarum*. En cada sitio, se recolectaron cinco submuestras a una profundidad de 30 cm, las cuales se integraron en una muestra compuesta. Posteriormente, se homogenizaron hasta obtener 1 kg por sitio, y se procesaron conforme a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT 2002).

Determinación de características físicoquímicas del suelo

Se realizaron algunos estudios al suelo como textura utilizando la metodología realizada por Bouyoucos (1951), el pH y conductividad eléctrica usando la metodología de Richards (1954), carbonatos totales usando la técnica de Allison y Moodie (1965), materia orgánica medida por el método Walkley y Black (1945), nitrógeno total por el método Kjeldahl (1883), contenido de fósforo por el método de Olsen *et al.* (1954) y potasio intercambiable por el método de acetato de amonio (Jackson 1958).

Aislamiento y cuantificación de hongos y bacterias

Para el aislamiento de hongos y bacterias del suelo, 20 g de cada muestra de suelo fueron colocados en una estufa a 105 °C durante 24 h. Luego, se tomaron 10 g de suelo seco y se agregaron a un matraz con 90 mL de agua destilada estéril; después se dispersó y homogenizó el suelo con un agitador magnético y consecutivamente se realizó la metodología de dilución seriada hasta 10⁻⁵, en donde se tomó 1 mL de la muestra, esta se introdujo en tubos de ensayo que tenían 9 mL de agua destilada estéril sucesivamente hasta a 10⁻³ para hongos y 10⁻⁵ para bacterias. Posteriormente, se inocularon 0.1 mL de dilución en cajas Petri preparadas previamente con medio de cultivo, papa de dextrosa agar (PDA) para la cuantificación de hongos 10⁻³ y para bacterias 10⁻⁵ colocándose la alícuota con distribución homogénea en la superficie de la placa con una varilla de vidrio previamente esterilizada. Después se incubaron las placas a 28 °C, observando su crecimiento de tres a siete días; al término de la evaluación, se purificaron y conservaron.

La cuantificación de bacterias y hongos [unidades formadoras de colonias (UFC)/g de suelo seco (g s.s.)] se realizó mediante la metodología de recuento en placa utilizada por Hoben y Somasegaran (1982), y utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Bacterias/hongos(UFC/g s.s.)} = [(NC \times 1)/(FD \times 1/V)]/(P \times FH)$$

Donde: NC = número de colonias en una caja, FD = factor de dilución, V = volumen inoculado en la caja = 0.1 mL, P = peso de la muestra húmeda = 1 g y FH = factor de humedad.

Caracterización morfológica de hongos

La identificación morfológica, a nivel de géneros, se realizó mediante las claves taxonómicas dicotómicas de Barnett y Hunter (1998). Se observaron las características microscópicas: forma, color de hifas, esporas, células conidiógenas y fiálides, complementadas con las características macroscópicas como forma y color de la colonia en medio PDA, el crecimiento del sinema, en el cual se realizaron montajes en porta y cubre objetos teñidos con azul de lactofenol y se observaron en un microscopio óptico a 40x.

Evaluación de cultivo dual de *Bacillus* contra *Colletotrichum* spp., y *Endocalyx* spp.

Para la evaluación de cultivo dual, se incrementaron *Bacillus* spp. en agar nutritivo (AN) 24 h antes de la evaluación y los hongos en PDA incrementados una semana antes de la confrontación, se utilizaron dos cepas de hongos *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp., en los cuales se estudió la actividad antifúngica de las cepas bacterianas, mediante la metodología de confrontación utilizada por Rubio-Tinajero *et al.* (2021).

En el centro de las cajas Petri con PDA se colocó un explante de 5 mm del hongo y en cuatro puntos cardinales de la misma se colocaron *Bacillus*; se realizaron cuatro réplicas por aislado. Las placas inoculadas se incubaron a 27 °C durante siete días. La actividad antifúngica del hongo fitopatógeno en presencia del antagonista bacteriano se determinó midiendo el diámetro de crecimiento a partir del día dos hasta el día nueve. Como control fue solamente el hongo y la medición terminó en cuanto el control llenó la caja Petri. El efecto fue determinado por inhibición del hongo, y las colonias se midieron cada 24 h durante nueve días. El Porcentaje de Inhibición del Crecimiento Radial (PICR) se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$PICR(\%) = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100$$

Donde: R1 es el radio del testigo y R2 es el radio del patógeno en el cultivo dual. Para la evaluación de la capacidad biocontroladora se empleó la escala utilizada por Corrales *et al.* (2011) (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación del porcentaje de inhibición del antagonismo.

Clasificación	Porcentaje de inhibición
Negativo	< 10%
Baja	10-39%
Media	40-69%
Positivo	70-100%

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software SAS 9.0®. Los datos de la cuantificación de microorganismos se analizaron bajo un diseño completamente al azar, utilizando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p \leq 0.05$), debido a la falta de homogeneidad de varianza tanto para bacterias como para hongos. Esta prueba es adecuada para comparar muestras independientes sin

asumir normalidad ni igualdad de varianza (Sherwani *et al.* 2021). Por otro lado, los valores del Porcentaje de Inhibición del Crecimiento Radial (PICR) se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey ($P = 0.05$) para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

RESULTADOS

Análisis fisicoquímico del suelo

Los suelos presentaron textura arcillosa, con un pH alcalino (7.8 a 8.5) fuera del rango óptimo (6-7.5). En conductividad eléctrica, solo S5 ($1.33 \text{ mmhos} \cdot \text{cm}^{-1}$) se encontró dentro del valor óptimo ($0.7\text{-}2 \text{ mmhos} \cdot \text{cm}^{-1}$). En materia orgánica, los sitios S3 y S5 se encontraron dentro del intervalo ideal (3.1-4.2%), siendo S2 notablemente superior (5.85%), lo que podría indicar un alto potencial de fertilidad, no obstante, S1 (2.08%) presentó un contenido deficiente. En cuanto a los macronutrientes evaluados en nitrógeno, todos los sitios, salvo S1 (0.12%), superan el rango óptimo (0.18-0.22%). En fósforo, todos los sitios se encuentran por debajo del rango ideal (5.5-11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), siendo este un factor limitante común en suelos con pH elevado. En el potasio se observaron niveles adecuados con los sitios S3 (164.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) y S4 (132.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), mientras que S2 presentó una marcada deficiencia (50.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Por último, el contenido de carbonatos de calcio es excesivo en el sitio S1 con un 50.29% y solo S2 y S3 se encontraron dentro del rango óptimo. En conjunto, S3 y S4 muestran un perfil más equilibrado de fertilidad, mientras que S1 presenta múltiples deficiencias y condiciones químicas limitantes para el desarrollo vegetal (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis fisicoquímicos del suelo en distintos predios con *Saccharum officinarum*.

Parámetros	S1	S2	S3	S4	S5	Rangos óptimos
Textura	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	
pH	8.5	7.9	8.0	7.8	8.1	6-7.5
Conductividad eléctrica ($\text{mmhos} \cdot \text{cm}^{-1}$)	0.6	0.4	0.3	0.4	1.3	0.7-2
Materia orgánica (%)	2.08	5.85	4.24	3.43	4.04	3.1-4.2
Nitrógeno total (%)	0.12	0.35	0.25	0.25	0.24	0.18-0.22
Fósforo intercambiable ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.2	0.1	0.6	2.3	1	5.5-11
Potasio intercambiable ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	97	50.82	164.21	132.93	74.28	100-125
Carbonatos de calcio totales (%)	50.29	16.33	16.20	20.25	29.67	10-20

*S = suelo en localidades de Tamaulipas, México. S1: Ejido La Taxqueña (Gómez Farias), S2: Ejido Las Flores Nuevo (Ocampo), S3: Ejido Las Muralla (Ocampo), S4: Ejido La Rivera (Ocampo) y S5: Ejido Las Flores Viejo (Ocampo).

Cuantificación de bacterias y hongos

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis se empleó para evaluar la cantidad de hongos y bacterias en suelos cultivados con *Saccharum officinarum*. En el caso de las bacterias, no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tipos de suelos, ya que todos los valores $\text{Pr} > |T|$ fueron mayores o iguales a 0.05. En particular, aunque la comparación entre los suelos S1 y S4 demostró un valor de $p = 0.05$, este resultado no cumple con el criterio de significancia

establecido ($p < 0.05$), por lo que al mostrarse valores superiores o iguales a este se indica que no hubo deferencia significativa entre los suelos de los diferentes sitios analizados (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de medias de la cantidad de bacterias en suelo con el cultivo de *Saccharum officinarum*.

Suelo	S1	S2	S3	S4	S5
S1		1.39	0.93	1.97	1.54
		0.17	0.35	0.05	0.12
S2	-1.39		-0.46	0.58	0.15
	0.17		0.64	0.56	0.88
S3	-0.93	0.46		1.04	0.61
	0.35	0.64		0.30	0.54
S4	-1.97	-0.58	-1.04		-0.43
	0.05	0.56	0.30		0.67
S5	-1.54	-0.15	-0.61	0.43	
	0.12	0.88	0.54	0.67	

*Cuando el valor $Pr>|T|$ sea menor que a $\alpha 0.05$, se considera que existe al menos una diferencia significativa entre suelos.

En la cuantificación de hongos identificados (Tabla 4), se observó una diferencia estadísticamente significativa entre los suelos S1 de ejido La Taxqueña de Gómez Farias, Tamaulipas, y S4 de ejido La Rivera de Ocampo, Tamaulipas, con un valor de $p = 0.04$, menor al nivel de significancia establecido ($p < 0.05$). Esto indica que la cantidad de hongos entre estos dos suelos es significativamente diferente. En contraste, las comparaciones entre S2, S3 y S5 no presentaron diferencias significativas, ya que sus valores $Pr>|T|$ fueron mayores a 0.05.

Tabla 4. Comparación de medias de la cantidad de hongos en suelo con el cultivo de *Saccharum officinarum*.

Suelo	S1	S2	S3	S4	S5
S1		-0.79	-0.76	-2.07	-1.00
		0.43	0.45	0.04	0.32
S2	0.79		0.03	-1.27	-0.20
	0.43		0.97	0.20	0.84
S3	0.76	-0.03		-1.31	-0.24
	0.45	0.97		0.19	0.81
S4	2.07	1.27	1.31		1.07
	0.04	0.20	0.19		0.29
S5	1.00	0.20	0.24	-1.07	
	0.32	0.84	0.81	0.29	

*Cuando el valor $Pr>|T|$ sea menor que $\alpha 0.05$, se considera que existe al menos una diferencia significativa entre suelos.

Identificación de hongos edáficos asociados al cultivo de *Saccharum officinarum*

En la Tabla 5 se describen las características macroscópicas y microscópicas de los hongos aislados de los diferentes suelos analizados, mientras que en la Figura 1 se observan imágenes

representativas de dichos microorganismos. El suelo S4 destacó por presentar la mayor diversidad fúngica, con cinco géneros identificados: *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Paecilomyces* spp., *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp. En segundo lugar, con dos hongos identificados, fueron S1 (*Penicillium* spp. y *Fusarium* spp.), S2 (*Dictyoarthrinium* spp. y *Aspergillus* spp.) y S3 (*Fusarium* spp. y *Paecilomyces* spp.). Asimismo, el suelo S5 mostró menor diversidad fúngica, al contener únicamente *Fusarium* spp.

Confrontación dual *in vitro* de cepas de *Bacillus* spp. contra *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp.

Se confrontaron siete cepas de *Bacillus* spp. aisladas de los suelos asociados al cultivo de *Saccharum officinarum*: B1 y B5, provienen de S3 (La Muralla, Ocampo, Tamaulipas), B3 y B7 de S1 (ejido La Taxqueña, Gómez Farias, Tamaulipas), B4 de S4 (ejido La Rivera, Ocampo, Tamaulipas); y dos cepas (B2 y B6) que se aislaron del suelo del tiradero a cielo abierto de Ciudad Victoria, Tamaulipas, frente a *Colletotrichum* spp., y *Endocalyx* spp., hongos identificados de los suelos analizados.

En evaluación dual de *Bacillus* spp., (B1, B2, B3, B4, B5, B6 y B7) contra *Colletotrichum* spp., (H1) (Figura 2), se mostró diferencia significativa entre los efectos de los tratamientos: La cepa B2 (*B. liquefasciens*) mostró la mayor actividad antagonista frente a H1, con un porcentaje de inhibición del 83.53% clasificado como antagonismo positivo (70-100%). La segunda cepa con clasificación positiva fue B1 (*B. subtilis*) con 72.08%. B6, B3, B7 y B5 mostraron niveles medios (40-69%) de antagonismo, con porcentajes que oscilaron de 54.27 a 68.11%. En contraparte, B4 fue la menos efectiva, con un 21.20% de inhibición (Tabla 6).

Tabla 5. Caracterización morfológica e identificación de hongos edáficos asociados al cultivo *Saccharum officinarum*.

Suelo	Características		Género
	Macroscópicas	Microscópicas	
S1	En el centro presenta un color verde oscuro con blanco en las orillas, presencia de micelio y revés con aspecto rugoso.	Conidióforos en forma de ramas terminadas en fiálides; conidios hialinos o de colores brillantes en masa, unicelulares, principalmente en forma de globo u ovoides, en cadena.	<i>Penicillium</i> spp.
S2	Esporas de color negro o marrón oscuro y por lo general se producen en masa.	Conidióforos simples, atestados, rectos o curvos, subhialinos, con tabiques gruesos y oscuros; conidios en forma de cruz, marrón oscuro.	<i>Dictyoarthrinium</i> spp.
S1 S4 S5	Micelio extenso, presenta diferentes pigmentaciones en el medio en que se encuentra, puede ser naranja, rosado, amarillo y violácea.	Macroconidios de varias células, ligeramente curvadas o dobladas en los extremos puntiagudos, típicamente en forma de canoa; microconidios de una célula, ovoides, nacen solos o en cadenas.	<i>Fusarium</i> spp.
S2 S4	Apariencia polvosa, presenta abundante micelio negro y elipses blancas y negras alternadas.	Conidióforos erguidos, simples, que terminan en un bulto globoso, que tiene fiálides en el ápice o que irradian desde el ápice o toda la superficie; conidios de una célula, globular, a menudo de diversos colores en masa, en cadena.	<i>Aspergillus</i> spp.
S3 S4	Colonias levantadas, aterciopeladas de color blanco con tonos rosados.	Conidióforos y ramas más divergentes que el <i>Penicillium</i> ; conidios en cadenas basípetas, una célula, ovoide a fusoides, hialino, saprófito.	<i>Paecilomyces</i> spp.
S4	Micelio blanquecino o gris claro, que con el tiempo torna a un gris oscuro a negro, ligeramente irregular y de textura algodonosa a terciopelada.	Conidióforos ramificados, rectos o flexuosos, lisos; los conidios se forman en largas cadenas o a menudo en solitario, ovoides o elipsoidales, con un pico cilíndrico o cónico corto.	<i>Colletotrichum</i> spp.
S3 S4	El color del micelio es blanco, con centro beige, textura algodonosa, afelpada, sin pigmentación fuerte, crecimiento radial y circular, con márgenes definidos.	Conidios sésiles o en ramas cortas de conidióforos, unicelulares, pardos, aplanados, ovoides o irregulares, con una hendidura germinal; en ramitas.	<i>Endocalyx</i> spp.

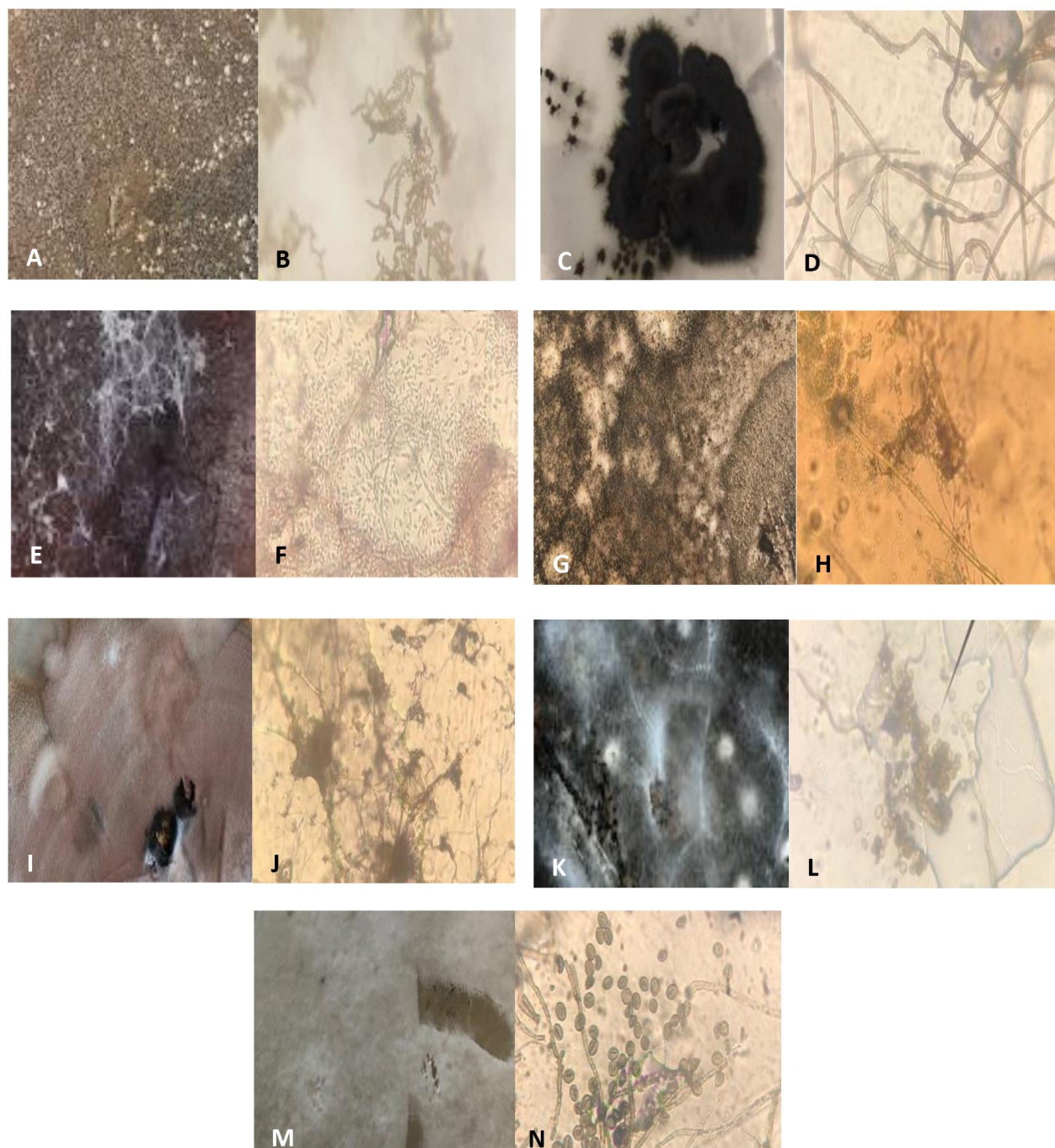


Figura 1. Morfología macroscópica en medio de cultivo y microscópica a 40x de los hongos aislados: *Penicillium* spp. (A-B), *Dictyoarthrinium* spp. (C-D), *Fusarium* spp. (E-F), *Aspergillus* spp. (G-H), *Paecilomyces* spp. (I-J), *Colletotrichum* spp. (K-L) y *Endocalyx* spp. (M-N).

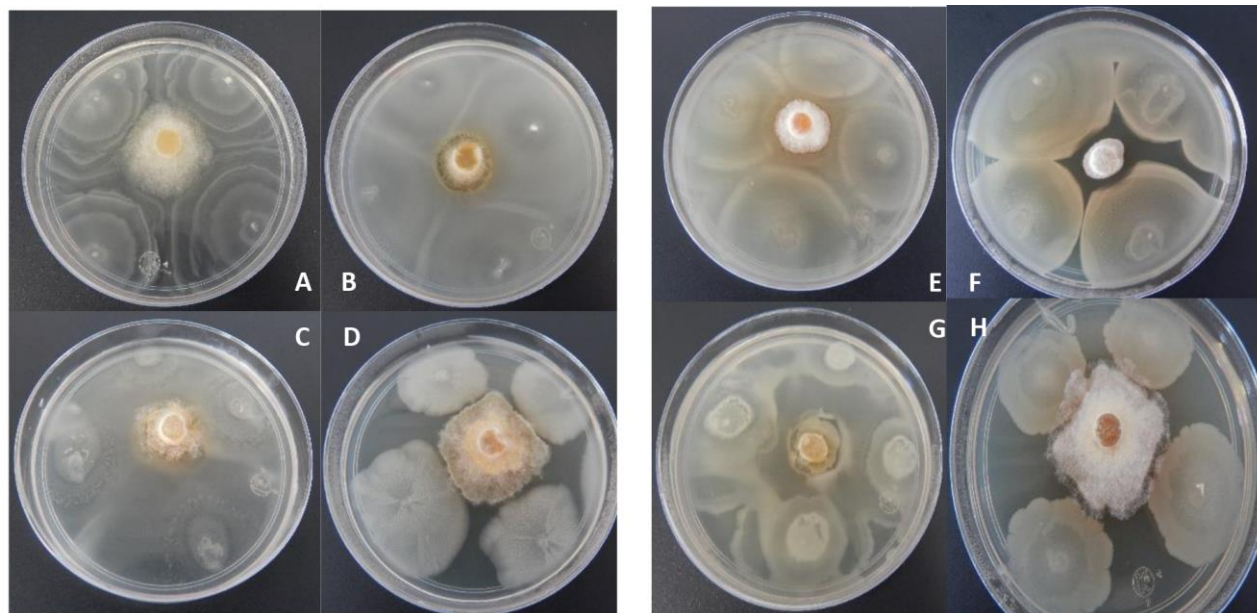


Figura 2. Inhibición del crecimiento de *Colletotrichum* spp. (H1) y *Endocalyx* spp. (H2) en confrontación dual con cepas de *Bacillus* spp. Para *Colletotrichum* spp.: B1 (A), B2 (B), B3 (C) y B6 (D); para *Endocalyx* spp.: B1 (E), B2 (F), B6 (G) y B7 (H).

Tabla 6. Confrontación de *Bacillus* spp., frente a *Colletotrichum* spp.

Tratamiento	Inhibición (%)	Clasificación de antagonismo
H1B2	83.534 A*	Positivo
H1B1	72.088 A	Positivo
H1B6	68.116 A	Media
H1B3	65.116 A	Media
H1B7	60.321 A	Media
H1B5	54.277 A	Media
H1B4	21.205 B	Baja

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P = 0.05$).

La confrontación *in vitro* de cepas de *Bacillus* spp., contra *Endocalyx* spp., (H2) reveló una variabilidad significativa en la capacidad antagonista entre los tratamientos evaluados. La cepa B6 (*B. amyloliquefaciens*) registró la mayor eficacia biocontroladora, con 81.54% de inhibición, clasificada como antagonismo positivo. En esta misma categoría, se encontró B1 (*B. subtilis*) con 80.24% de inhibición. Las cepas B7 y B2 exhibieron un efecto medio con valores de 67.55 y 64.36%, respectivamente. En contraste, B5, B4 y B3 mostraron una actividad inhibitoria limitada, con porcentajes entre 33.61 y 38.25%, clasificados como un antagonismo bajo (Tabla 7).

En la Figura 2 se observan las confrontaciones duales *in vitro* entre cepas de *Bacillus* spp. y los hongos *Colletotrichum* spp. (H1) y *Endocalyx* spp. (H2) respectivamente. En ambos casos se observaron en zonas claras de inhibición del crecimiento fúngico, resultado de la actividad antagonista de las cepas de *Bacillus* spp. De acuerdo con lo obtenido en las Tablas 6 y 7, se

seleccionaron las cuatro cepas con mayor capacidad inhibitoria, clasificadas como antagonismo positivo y medio para su representación visual.

Tabla 7. Confrontación de *Bacillus* spp. frente a *Endocalyx* spp.

Tratamiento	Inhibición (%)	Clasificación de antagonismo
H2B6	81.54 A*	Positivo
H2B1	80.24 A	Positivo
H2B7	67.55 AB	Media
H2B2	64.36 AB	Media
H2B5	38.25 B	Baja
H2B4	37.11 B	Baja
H2B3	33.61 B	Baja

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P = 0.05$).

DISCUSIÓN

En los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo colectadas en predios cultivados con *Saccharum officinarum* se encontró una textura arcillosa y pH alcalino. Esta alcalinidad propicia problemas de solubilidad y disponibilidad de nutrientes, lo que causa deficiencias de macro y micronutrientes esenciales para el óptimo desarrollo de las plantas (Aguirre-Forero 2022). Por lo tanto, se puede asumir que el bajo contenido de fósforo (P) registrado en todos los sitios de muestreo se debe a este factor. Aunado a esto la presencia de carbonatos de calcio (CaCO_3), tiene como efecto aumentar el pH en estos suelos, por lo que reducen su la disponibilidad de P por sorción y precipitación (Geng *et al.* 2022). Por lo tanto, se asume que el pH alcalino y exceso de (CaCO_3), contribuyeron a la baja disponibilidad del P en estos suelos. En cuanto al potasio (K) este presento niveles adecuados en los suelos S3 y S4, resultados que podrían discutirse según Solórzano *et al.* (2021) ya que mencionan la cantidad y calidad de arcillas presentes en el suelo, depende de la reserva de K intercambiable. En el contenido de materia orgánica (MO), S1 presentó un valor deficiente (2.08%) por el contrario S2 registró mayor porcentaje (5.85%). Dicha variabilidad podría deberse a las diferencias en el manejo agronómico y las condiciones edáficas, lo cual está relacionado a que la MO incide de forma directa en la actividad microbiana del suelo (Visconti-Moreno *et al.* 2024), además, determina las propiedades físicas y químicas que influyen en la fertilidad (Árevalo-Gardini *et al.* 2020). En la concentración de nitrógeno (N) se encontró una correlación con los niveles de MO (Santos *et al.* 2022). En este estudio S1 con el menor porcentaje de MO, obtuvo también una menor concentración de N (0.12%), mientras que S2, con el valor más alto de MO, alcanzo la mayor concentración de N (0.35%), lo que sugiere una relación directa entre ambos parámetros. Según Ren *et al.* (2022) los factores temperatura, textura y contenido de MO son determinantes en la composición de las comunidades bacterianas.

Los suelos analizados de Gómez Farias (S1) y Ocampo (S2, S3, S4 y S5), Tamaulipas, mostraron similitudes en las UFC de bacterias, esto se atribuye a la homogeneidad de las características texturales edáficas las cuales mostraron ser suelos arcillosos, que de acuerdo con Zheng *et al.* (2021)

mencionan que la textura del suelo y la fertilización nitrogenada son indicativos de una baja o alta comunidad bacteriana, dichos autores comprobaron que en suelos arcillosos se limita el crecimiento de bacterias debido a una escasa porosidad y retención de oxígeno; además mencionan que las texturas francos-arenosas y franco-arcillosas contienen mayor diversidad bacteriana (Márquez *et al.* 2025). Lo que corrobora lo encontrado en estos sitios, ya que además de la textura arcillosa, la principal fuente de nutrición es mediante la fertilización nitrogenada.

Respecto a las UFC fúngicas, se encontró que el suelo S1 de Ejido La Taxqueña de Gómez Farias, Tamaulipas, y S4 de Ejido la Rivera de Ocampo, Tamaulipas, mostraron diferencias significativas, por lo que su diferencia se le atribuye a factores ambientales y edáficos locales que influyen en la diversidad de la microbiota (Alvarado-Barrientos *et al.* 2021). Mientras que Moreno y Galvis (2013) mencionan que los microorganismos del suelo se pueden adaptar a condiciones adversas, inclusive de escasez de nutrientes, lo que difiere con el presente estudio, ya que S4 destacó con mayor disponibilidad de P, un contenido de K solo superado por S3 y MO dentro del rango adecuado. En este mismo contexto, Saucedo *et al.* (2015) destacan que el P estimula el desarrollo de las comunidades microbianas edáficas. Otro factor que predice este aumento en la microbiota es el contenido de MO, ya que Wu *et al.* (2024) reportaron que la MO funciona como fuente de carbono que regula la actividad enzimática y contribuye a la formación de microhábitats. Así que la sinergia entre la disponibilidad de nutrientes y la cantidad de MO propicia que el suelo S4 desarrolle una comunidad fúngica más activa.

En la identificación de géneros fúngicos edáficos, S4 destacó por albergar la mayor diversidad de géneros aislados. De los siete géneros identificados: *Penicillium* spp., *Dictyoarthrinium* spp., *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Paecilomyces* spp., *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp., cinco fueron encontrados en este suelo, los cuales corresponden a *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Paecilomyces* spp., *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp., lo cual podría deberse al uso excesivo de productos sintéticos, las prácticas de quema de la caña de azúcar, la poca rotación de cultivos, entre algunas otras prácticas agrícolas que están estrechamente relacionados a la producción de la caña de azúcar que pueden impactar negativamente la reproducción de microorganismos y por lo tanto la biodiversidad microbiana del suelo se ve afectada y disminuye, en especial los hongos saprobios y antagonistas; en cambio, los hongos fitopatógenos pueden proliferar de una mejor manera (Alvarado-Barrientos *et al.* 2021). Esta tendencia se observó en los resultados obtenidos, lo cual coincide con lo mencionado por Parasar y Agarwala *et al.* (2025), quienes sugieren que la microbiota natural de los suelos se ve afectada por el manejo agrícola intensivo y podría traer consecuencias negativas para la reducción de hongos benéficos, pero podría favorecer el incremento de patógenos. En este sentido, Bouwman *et al.* (2025) destacaron la importancia de mejorar las prácticas agrícolas que promueven la diversidad de hongos benéficos y se busque la manera de mitigar el desarrollo de hongos oportunistas. Lo cual podría ser crucial para mantener la estabilidad y funcionalidad del agroecosistema garantizando la productividad y el equilibrio del suelo en el contexto de una agricultura moderna y responsable.

Dentro de los géneros que fueron identificados, se encontraron hongos fitopatógenos como *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp. De los cuales *Fusarium* spp., destaca ampliamente por ser conocido por su patogenicidad (Forero-Reyes *et al.* 2018), de la cual se han identificado múltiples especies, tanto de tejidos como de suelos colectados en plantaciones

de caña de azúcar en Brasil (Silva *et al.* 2025). Entre las especies encontradas destacan *F. verticillioides*, *F. proliferatum* y *F. sacchari*, con variabilidad genética y virulencia que afecta a la planta, causando pudrición roja y marchitez vascular. *Fusarium* spp., es considerado un hongo cosmopolita por la diversidad de plantas que puede afectar (Naqvi *et al.* 2025). Otro de los hongos de gran importancia es *Aspergillus* spp., ya que algunas de sus especies son conocidas por su producción de micotoxinas que contaminan los cultivos, afectan la calidad, seguridad alimentaria y causan daños en cultivos como gramíneas, algodón y frutales (Zakaria 2024). Además, se encontró a *Colletotrichum* spp., causante de antracnosis en frutales, cereales y hortalizas (Singh *et al.* 2025), ha sido aislado desde residuos de plantas y suelo, tiene la capacidad de mantenerse en el ambiente como saprófito hasta encontrar condiciones favorables para infectar y se ha reportado la presencia de diversas especies de *Colletotrichum* en suelos cultivados con caña de azúcar en Sudáfrica (Machado *et al.* 2024). Sin embargo, Silva *et al.* (2024) realizaron caracterización morfológica y molecular de diversas especies de *Colletotrichum falcatum* aisladas en India, que revelaron una considerable variabilidad en la virulencia entre los aislamientos. Además, en México, Rojo-Báez *et al.* (2017) mencionan que se han identificado 46 especies, principalmente *Colletotrichum gloesporioides* y *C. truncatum*, que afectan a la papaya, chile, mango, limón y aguacate, su amplio rango de hospedante se debe a sus estrategias de infección como la colonización intramural, subcuticular e intracelular. También Singh *et al.* (2025) confirmaron, mediante análisis de secuenciación ITS la coexistencia de múltiples especies del género *Colletotrichum* infectando cultivos de caña de azúcar, lo que sugiere que la enfermedad causada por este fitopatógeno puede ser debido a un complejo de especies más amplio y variado de lo que previamente se había considerado. En el caso de *Endocalyx* spp., este es un género aún poco estudiado, aunque presenta características morfológicas bien definidas: conidios ovalados, unicelulares; hifas hialinas septadas y micelio blanco con centro crema a marrón claro, cuentan con ascos bitunicados, cilíndricos y con base pediculada que usualmente son bicelulares, de forma elipsoidal a fusiforme (Konta *et al.* 2021). Fue aislado en el municipio de Ocampo, de Tamaulipas, México, que cuenta con una región tropical-subtropical con clima cálido subhúmedo y lluvias en verano (Baltazar y Solano 2020), lo que podría favorecer el desarrollo de una amplia diversidad de organismos en el suelo tal es el caso de *Endocalyx* spp. Descrito y caracterizado por ser un hongo saprobio, asociado a la descomposición de material vegetal como hojas, ramas o cortezas, ubicado en zonas tropicales y subtropicales (Wijayawardene *et al.* 2022). No obstante, investigaciones mediante un análisis genómico identificaron en *Endocalyx cintus* un grupo de genes relacionados con la producción de fujikurinas, compuestos identificados por estar relacionados con causar enfermedades en las plantas, dichos compuestos encontrados en *Fusarium* spp. (Sbaraini *et al.* 2017). Por tal motivo, este hallazgo podría cambiar la perspectiva que se tiene sobre *Endocalyx* spp., ya que podría tener el potencial para actuar como fitopatógeno, aunque para estar seguros se requiere de más investigaciones al respecto.

En las confrontaciones *in vitro* de las cepas de *Bacillus* spp. contra *Colletotrichum* spp. (H1) y *Endocalyx* spp. (H2), se observó un efecto antagónico significativo y positivo. En el caso de *Colletotrichum* spp. las cepas que destacaron con mayor porcentaje de inhibición fueron *B. liquefasciens* (B2) con un porcentaje del 83.53% de antagonismo y se observó un halo de inhibición, el cual no le permitió al hongo fitopatógeno seguir creciendo y quedó confinado en el centro de la caja Petri, dicho porcentaje de inhibición fue más alto que lo reportado por Zhao *et al.* (2022),

quienes encontraron que *B. amyloliquefaciens* inhibió un 64% el crecimiento de seis hongos productores de micotoxinas y con una inhibición máxima del 81% contra *Aspergillus ochraceus*, lo que resalta su eficacia como agente de Biocontrol. Otra de las bacterias que destacó fue *B. subtilis* (B1) con un porcentaje de antagonismo del 72.08%. Además, se pudo observar cómo la bacteria creció rápidamente alrededor del hongo, lo cual podría atribuirse a la competencia por espacio y nutrientes, resultados similares a los obtenidos por Heo *et al.* (2024), quienes también realizaron la confrontación de *B. subtilis* frente a *Colletotrichum* spp. En el caso de *Endocalyx* spp., destacaron las cepas *B. amyloliquefaciens* (B6) mostrando un porcentaje de antagonismo de 80.54% y en donde se pudo observar cómo los metabolitos produjeron que se afectara la integridad del hongo en el halo de crecimiento en la parte superior del explante (Figura 2G), lo cual podría deberse a lo mencionado por Soliman *et al.* (2022), quienes mencionan que el halo de inhibición podría ser a causa de metabolitos secundarios como surfactina, fungicida e iturina que son producidos por el género *Bacillus* spp., lo cual coincide con lo mencionado por Rubio-Tinajero *et al.* (2022) quienes encontraron que las cepas de *B. amyloliquefaciens* y *B. liquefaciens* tienen la capacidad de producir metabolitos secundarios con actividad antibacteriana y antifúngicos que afectan la integridad de la estructura de los hongos fitopatógenos. Otra de las cepas que destacó en la confrontación contra *Endocalyx* spp., fue *B. subtilis* (B1) con un antagonismo de 80.24%, dicha bacteria rodeó completamente al hongo, el cual fue confinado al centro de la caja Petri (Figura 2A). Por lo que se considera que B2, B6 y B1 destacaron por mostrar un efecto antagónico positivo en comparación con el resto de las cepas. Sin embargo, *B. subtilis* (B1) destacó en inhibir el crecimiento del micelio en ambos fitopatógenos. El potencial antagonista de *B. subtilis* se atribuye a su capacidad para producir una amplia gama de metabolitos secundarios, proteínas antifúngicas, antimicrobianos y antibióticos (Cedeño-Alcázar *et al.* 2023). Así mismo, *B. amyloliquefaciens* y *B. liquefaciens*, ambas especies, destacan por su capacidad de producir metabolitos secundarios con actividad antibacteriana y antifúngica (Soliman *et al.* 2022).

CONCLUSIONES

En los suelos asociados al cultivo de *Saccharum officinarum* pertenecientes a los municipios de Gómez Farias (S1) y Ocampo (S2, S3, S4 y S5) Tamaulipas, México, se identificaron siete hongos; *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Colletotrichum* spp. y *Endocalyx* spp., caracterizados como fitopatógenos y *Paecilomyces* spp., *Penicillium* spp. y *Dictyoarthrinium* spp., como benéficos, con S4 destacando con mayor diversidad fúngica. En la confrontación dual de *Bacillus* spp., contra *Colletotrichum* spp., destacaron *B. liquefaciens* (B2) y *B. subtilis* (B1) y frente a *Endocalyx* spp. fueron *B. amyloliquefaciens* y *B. subtilis*, esta última mostró eficacia en el control de ambos hongos fitopatógenos. Por lo anterior se destaca el potencial de dichas cepas como agentes con potencial biocontrolador efectivas para el manejo de enfermedades fúngicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Tamaulipas, a la Facultad de Ingeniería y Ciencias y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por los apoyos a la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Forero SE, Piraneque-Gambasica NV, Cabarcas-Saumeth DE (2022) Compost de Cascara de naranja: una alternativa de aprovechamiento y reciclaje de materia orgánica en la región Caribe de Colombia. *Entramado* 18(1): 1-11. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.8063>
- Allison LE, Moodie (1965) Methods of soil analysis. C. D. Carbonates. In: Black CA (ed) Part 2. Agronomía Monografía. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI, USA. pp. 1379-1396.
- Almeida OAC, de Araujo NO, Mulato ATN, Persinoti GF, Sforça ML, Calderan-Rodrigues MJ, Oliveira JVD (2023) Bacterial volatile organic compounds (VOCs) promote growth and induce metabolic changes in rice. *Frontiers Plant Science* 13: 1056082. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1056082>
- Alvarado-Barrientos MS, Hernández-Silva II, López-Martínez JO, Macario-Mendoza PA (2021) Examinando el aspecto biofísico del cambio climático: el impacto de deforestar para cultivar caña de azúcar. *Guatemala Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático–Yu'am* 4(2): 56-67.
- Andrade-Hoyos P, Rivera-Jiménez MN, Landero-Valenzuela N, Silva-Rojas HV, Martínez-Salgado SJ, Romero-Arenas O (2023) Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma* spp., en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología* 55(4): 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.005>
- Árevalo-Gardini E, Canto M, Alegre J, Árevalo-Hernández CO, Loli O, Julca A, Baligar V (2020) Cacao agroforestry management systems effects on soil fungi diversity in the Peruvian Amazon. *Ecological Indicators* 115: 106404. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106404>
- Ashwin NMR, Barnabas L, Amalamol D, Valiyaveetil LK, Sundar AR, Malathi P, Viswanathan R (2020) Transcriptional reprogramming of major defense-signaling pathway during defense priming and sugarcane- *Colletotrichum falcatum* interaction. *Molecular Biology Reports* 47(11): 8911-8923. <https://doi.org/10.1007/s11033-020-05944-z>
- Baltazar S, Solano R (2020) Diversidad y rasgos funcionales de orquídeas terrestres en bosques de un área natural protegida del noreste de México. *Botanical Sciences* 98(4): 695-712.
- Barnett HL, Hunter BB (1998) Illustrated genera of imperfect fungi. American Phytopathological Society. APS Press. USA. 218p.
- Beyari EA (2025) Alternatives to chemical pesticides: the role of microbial biocontrol agents in phytopathogen management: A comprehensive review. *Journal of Plant Pathology*. 107(1): 29-314. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01808-8>
- Bouwman T, Higa L, Lee C, Young S, Ragasa A, Bonito G, Nguyen NH, Du ZY (2025) Biochemical and molecular characterization of fungal isolates from California annual grassland soil. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts* 18(1): 56. <https://doi.org/10.1186/s13068-025-02651-4>

- Bouyoucos GJA (1951) Recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal* 43: 435-438.
- Carbó YM, Echevarría CMA, Castillo IR (2021) Sistema inteligente para el diagnóstico de plagas y enfermedades en el cultivo del arroz. *Didáctica y Educación* 12(4): 141-155.
- Cedeño-Alcía DC, Vera-Macías LA, Cedeño-Guzmán WP, Vélez-Zambrano SM (2023) Inhibición del crecimiento in vitro de *Bacillus* spp sobre hongos asociados al proceso de fermentación en cacao. *Manglar* 20(3): 233-238. <http://doi.org/10.57188/manglar.2023.026>
- Chaibub AA, Gundim JAB, de Sousa NM (2024) *Colletotrichum falcatum* e complexo de espécies de *Fusarium* spp. na cana-de-açúcar: caracterização das doenças e estratégias de controle. *Caderno Pedagógico* 21(5): e4146-e4146. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n5-134>
- Compant S, Cassan F, Kostić T, Johnson L, Brader G, Trognitz F, Sessitsch A (2025) Harnessing the plant microbiome for sustainable crop production. *Nature Reviews Microbiology* 23(1): 9-23. <https://doi.org/10.1038/s41579-024-01079-1>
- Corrales, LC, Sánchez, LC, Cuervo J, Bautista D, González L, Guevara M (2011) Evaluación del efecto biocontrolador de *Bacillus* spp., frente a *Fusarium* spp., bajo condiciones de invernadero en *Rosmarinus officinalis* L. *Nova* 8(13): 63-75. <https://doi.org/10.22490/issn.2462-9448>
- FAO (2024) World food and agriculture. Statistical yearbook 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 384p. <https://doi.org/10.4060/cd2971en>
- Forero-Reyes CM, Alvarado-Fernández AM, Ceballos-Rojas AM, González-Carmona LC, Linares-Linares MY, Castañeda-Salazar R, Pulido-Villamarín A, Góngora-Medina ME, Cortés-Vecino JA, Rodríguez-Bocanegra MX (2018) Evaluación de la capacidad patogénica de *Fusarium* spp. en modelos vegetales y murino. *Revista Argentina de Microbiología* 50(1): 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.009>
- Geng Y, Pan S, Zhang L, Qiu J, He K, Gao H, Li Z, Tian D (2022) Phosphorus biogeochemistry regulated by carbonates in soil. *Environmental Research* 214: 113894. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113894>
- Heo Y, Lee Y, Balaraju K, Jeon Y (2024) Characterization and evaluation of *Bacillus subtilis* GYUN-2311 as a biocontrol agent against *Colletotrichum* spp. on apple and hot pepper in Korea. *Frontiers Microbiology* 14: 1322641. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1322641>
- Hoben HJ, Somasegaran P (1982) Comparison of the pour, spread, and drop plate methods for enumeration of *Rhizobium* spp. in inoculants made from presterilized peat. *Applied and Environmental Microbiology* 44(5): 1246-1247.
- Hussain S, Tai B, Ali M, Jahan I, Sakina S, Wang G, Zhang X, Yin Y, Xing F (2024) Antifungal potential of lipopeptides produced by the *Bacillus siamensis* Sh420 strain against *Fusarium graminearum*. *Microbiology Spectrum* 12(4): e0400823. <https://doi.org/10.1128/spectrum.04008-23>
- Jackson ML (1958) *Soil Chemical Analysis*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ. USA. 498p.
- Kjeldahl J (1883) A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschrift Für Analytische Chemie* 22: 366-382.
- Konta S, Hyde KD, Eungwanichayapant PD, Karunarathna SC, Samarakoon MC, Xu J, Dauner LAP, Aluthwattha ST, Lumyong S, Tibpromma S (2021) Multigene phylogeny reveals *Haploanthostomella elaeidis* gen. et sp. nov. and familial replacement of *Endocalyx* (Xylariales, Sordariomycetes, Ascomycota). *Life* 11(6): 486. <https://doi.org/10.3390/life11060486>
- Machado SCS, Veloso JS, Cámara MPS, Viera Was, Jumbo LOV, Aguiar RWS, Cangussu ASR, Giongo MV, Moraes CB, Campos FS, Araújo SHC, Oliveira EE, Santos GRD (2024) Diversity, prevalence and virulence of *Colletotrichum* species causing anthracnose on cassava leaves in the northern region Brazil. *Journal Fungi* 10(6): 367. <https://doi.org/10.3390/jof10060367>
- Markelova N, Chumak A (2025) Antimicrobial activity of *Bacillus* cyclic lipopeptides and their role in the host adaptive response to changes in environmental conditions. *International Journal of Molecular Sciences* 26(1): 36. <https://doi.org/10.3390/ijms26010336>

- Márquez G, Hernández JA, García M, Hernández M, López B, Castillo EP (2025) Análisis comparativo del porcentaje de materia orgánica y su relación con la textura del suelo en las regiones de Tlaxcala. Alianza y Tendencias BUAP 10(37). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15062291>
- Moreno LY, Galvis F (2013) Potencial biofertilizante de bacterias diazótrofes aisladas de muestras de suelo rizosférico. Pastos y Forrajes 36(1): 33-37.
- Naqvi SAH, Farhan M, Ahmad M, Kiran R, Shahbaz M, Abbas A, Hakin F, Shabbir M, Tan YS, Sathiya Seelan JS (2025) Fungicide resistance in *Fusarium* species: Exploring environmental impacts and sustainable management strategies. Archives of Microbiology 207(2): 31. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04219-6>
- Nonthakaew N, Sharkey LKR, Pidot SJ (2025) The genus *Nocardia* as a source of new antimicrobials. Npj Antimicrobials and Resistance 3(1): 5. <https://doi.org/10.1038/s44259-025-00075-6>
- Olsen SR, Cole CW, Watanabe F, Dean LA (1954) Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular No. 939, US Government Printing Office, Washington DC. 19p.
- Parasar BJ, Agarwala N (2025) Unravelling the role of biochar-microbe-soil tripartite interaction in regulating soil carbon and nitrogen budget: a panacea to soil sustainability, Biochar 7: 37. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00411-5>
- Ren B, Hu Y, Bu R (2022) Vertical distribution patterns and drivers of soil bacterial communities across the continuous permafrost region of northeastern China. Ecological Processes 11(1): 6. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00348-8>
- Richards LA (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. US Salinity Laboratory Staff. Handbook No. 60. USDA Agriculture. Washington. D.C. USA. 6p.
- Rojó-Báez I, Álvarez-Rodríguez B, García-Estrada RS, León-Félix J, Sañudo-Barajas A, Allende-Molar R (2017) Current status of *Colletotrichum* spp. in Mexico: Taxonomy, characterization, pathogenesis and control. Revista Mexicana de Fitopatología 35(3): 549-570. <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1703-9>
- Rubio-Tinajero S, Osorio-Hernández E, Estrada-Drouaillet B, Silva-Espinosa JHT, Rodríguez-Mejía MDL, Nava-Juárez RA (2021) Biocontrol in vitro de *Fusarium oxysporum* y *Dickeya chrysanthemi* con antagonistas. Revista Mexicana de Fitopatología 39(3): 515-528. <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2104-1>
- Rubio-Tinajero S, Osorio-Hernández E, Estrada-Drouaillet B, Silva-Espinosa JHT, Delgado-Martínez R, Espinoza-Ahumada CA, Torres-Castillo JA (2022) In vitro biocontrol of *Fusarium oxysporum* with antagonistic microorganisms and In vivo effect on *Solanum lycopersicum* L. Journal of Environmental Science and Health 57(8): 625-635. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2093590>
- Santos RMD, Desoignies N, Rigobelo EC (2022) The bacterial world inside the plant. Frontiers in Sustainable Food Systems 6: 830198. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.830198>
- Saucedo CO, de Mello PR, Castellanos GL, Ely N, Silva CC, Pereira DG, Assis LC (2015) Efecto de la fertilización fosfatada con cachaza sobre la actividad microbiana del suelo y la absorción de fósforo en caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 47(1): 33-42.
- Sbaraini N, Andreis FC, Thompson CE, Guedes RLM, Junges Á, Campos T, Staats C, Vainstein MH, Ribeiro de Vasconcelos AT, Schrank A (2017) Genome-wide analysis of secondary metabolite gene cluster in *Ophistoma ulmi* and *Ophistoma novo-ulmi* reveals afujikurin-like gene cluster with a putative role in infection. Frontiers in Microbiology 8: 1063. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01063>
- SEMARNAT (2002) Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario oficial de la federación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Segunda sección. México.

- Sherwani RAK, Shakeel H, Awan WB, Faheem M, Aslam M (2021) Analysis of COVID-19 data using neutrosophic Kruskal Wallis H test. BMC Medical Research Methodology 21(1): 215. <https://doi.org/10.1186/s12874-021-01410-x>
- Silva FR, Resende MLV, de Ferreira LC, Adesina O, Xavier KV (2024) Molecular characterization and pathogenicity of *Colletotrichum falcatum* causing red rot on sugarcane in Southern Florida. Journal of Fungi 10(11): 742. <https://doi.org/10.3390/jof0110742>
- Silva SACd, Pedrosa SKB, Nascimento BRd, Souza-Motta Cd, Oliveira NTd, Tiago PV (2025) Four novel *Fusarium* species from Brazil. Mycological Progress 24(1): 5. <https://doi.org/10.1007/s11557-024-02024-5>
- Singh D, Sharma L, Goswami SK, Raj C, Tiwari RK, Singh V (2025) Biodiversity of fungal pathogens of sugarcane crop and their management. In: Manoharachary C, Singh HB, Singh SK, Sharma YP (eds) Biodiversity, Bioengineering, and Biotechnology of Fungi. Academic Press. London, UK. pp. 353-391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13856-0.00015-4>
- Slininger PJ, Schisler DA, Olsen NL, Shea-Anders MA, Woodell LK, Hendricks RL, Miller JS, Dien BS (2025) Control of *Fusarium* dry rot on postharvest Russet Burbank and Clearwater Russet potatoes by *Pseudomonas* biocontrol agents used alone and in combination with a chemical fungicide. American Journal of Potato Research. <https://doi.org/10.1007/s12230-025-09989-3>
- Soliman SA, Khaleil MM, Metwally RA (2022) Evaluation of the antifungal activity of *Bacillus amyloliquefaciens* and *B. velezensis* and characterization of the bioactive secondary metabolites produced against pathogenic fungi. Biology 11(10): 1390. <https://doi.org/10.3390/biology11101390>
- Solórzano PR, Torres PSJ, García J (2021) Disponibilidad de potasio y su relación con el contenido de arcilla en suelos venezolano. Revista Facultad de Agronomía 47: (1) 15-23
- Tovar SAO, Cuéllar LM, Suárez LR (2020) Importancia de la biota edáfica para la productividad en agroecosistemas. Nova 6: 27-38.
- Valenzuela-Ruiz V, Gálvez-Gamboa GT, Villa-Rodríguez ED, Parra-Cota FI, Santoyo G, Santos-Villalobos SDL (2020) Lipopéptidos producidos por agentes de control biológico del género *Bacillus*: revisión de herramientas analíticas utilizadas para su estudio. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 11(2): 419-432. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2191>
- Visconti-Moreno EF, Valenzuela-Balcazar IG, Agudelo DP (2024) Evaluation of microorganisms response to soil physical conditions under different agriculture use systems. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 77(1): 10573-10583. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v77n1.107127>
- Viswanathan R, Selvakumar R, Manivannan K, Nithyanantham R, Kaverinathan K (2020) Behavior of soil borne inoculum of *Colletotrichum Falcatum* in causing red rot in sugarcane varieties with disease resistance. Sugar Tech 22(3): 485-497. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00800-7>
- Walkley A, Black IA (1945) An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38.
- Wijayawardene NN, Phillips AJL, Pereira DS, Dai DQ, Aptroot A, Monteiro JS, Druzhinina IS, Cai F, Fan X, Selbmann L, Coleine C, Castañeda-Ruiz RF, Kukwa M, Flakus A, Fiuza PO, Kirk PM, Kumar KCR, leperuma Arachchi IS, Suwannarach N, Tang LZ, Boekhout T, Tan CS, Jayasinghe RPPK, Thines M (2022) Forecasting the number of species of asexually reproducing fungi (Ascomycota and Basidiomycota). Fungal Diversity 114(1): 463-490. <https://doi.org/10.1007/s13225-022-00500-5>
- Wu S, Fu W, Rilling MC, Chen B, Zhu YG, Huang L (2024) Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi-an updated conceptual framework. New Phytologist 242(4): 1417-1425. <https://doi.org/10.1111/nph.19178>
- Zakaria L (2024) An overview of *Aspergillus* species associated with plant diseases. Pathogens 13(9): 813. <https://doi.org/10.3390/pathogens13090813>

- Zhao M, Liu D, Ling Z, Huang K, Wu X (2022) Antagonistic activity of *Bacillus subtilis* CW14 and its β -glucanase against *Aspergillus ochraceus*. Food Control 131: 108475. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108475>
- Zheng M, Zhu P, Zheng J, Xue L, Zhu Q, Cai X, Cheng S, Zhang Z, Kong F, Zhang J (2021) Effects of soil texture and nitrogen fertilization on soil bacterial community structure and nitrogen uptake in flue-cured tobacco. Scientific Reports 11(1): 22643. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01957-1>.