

Tratamientos biológicos y botánicos como estrategia dual de control y bioestimulación en maíz afectado por *Fusarium verticillioides*

Juan Francisco González-Ledesma¹

Abiel Sánchez-Arizpe¹

Norma Angélica Ruíz-Torres²

Patricia Fernández-Guzmán¹

Epifanio Castro-del Ángel^{1,§}

1 Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Departamento de Parasitología Agrícola, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

2 Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Departamento de Fitomejoramiento, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

§Autor para correspondencia: epifanio.castro@uaaan.edu.mx.

Resumen

Los hongos fitopatógenos en cereales básicos pueden no solo afectar la productividad sino también la salud de quienes los consumen. El objetivo de la presente investigación fue determinar la actividad antifúngica de *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* así como de los extractos hidroalcohólicos de *Larrea tridentata* y *Argemone mexicana* contra *Fusarium verticillioides* bajo condiciones de laboratorio y en campo. La inhibición in vitro en cultivos duales contra el fitopatógeno se obtuvo en un rango del 82 al 86% para el caso de *T. harzianum*, *B. subtilis* y *L. tridentata* mientras que con *A. mexicana* un 18%. Los tratamientos lograron reducir la incidencia en el grano cosechado más de un 70% en las plantas que recibieron los tratamientos con respecto al testigo. La aplicación de los tratamientos con *T. harzianum*, *B. subtilis*, *A. mexicana*, *L. tridentata* y una combinación de *T. harzianum* y *B. subtilis* lograron un incremento significativo de altura de planta relacionado directamente con el índice de área foliar lo cual se tradujo en un llenado de grano óptimo en comparación con el testigo, como resultado el potencial de rendimiento del híbrido Hernán Cortés se expresó significativamente, donde además los extractos botánicos resultaron sobresalientes del testigo y los propios microorganismos resultando en un mayor peso de mazorcas. La corroboración molecular de la cepa fitopatógena indicó el 99% de identidad con *F. verticillioides* contenida en el banco de datos del Gen Bank.

Palabras clave:

Zea mays L., antagonistas, biocontrol, bioestimulación, incidencia.



Introducción

El maíz posee gran diversidad genética, resultado de la selección humana a lo largo de siglos para adaptarlo a distintos ambientes o usos, permitiendo la generación de materiales que satisfacen tanto necesidades tradicionales como nuevas (González-Santos *et al.* , 2023). México es uno de los mayores consumidores de maíz en el mundo, siendo este la base de su alimentación. Además, es el cultivo más producido en el país colocándolo como cuarto lugar a nivel mundial (González y Ávila, 2014).

Con una producción de 27 millones de toneladas (FIRA, 2024) y un déficit de 11 millones al año, por pérdidas, causadas por infestación de plagas, principalmente hongos, cuya presencia se favorece por intensas lluvias o sequía (Peña, 2017). En regiones de climas tropicales y subtropicales la producción de este cereal se ve seriamente afectada por *Fusarium verticillioides* agente responsable de pudrición del tallo, mazorca y las raíces del maíz (Figueroa-López *et al.* , 2016).

La contaminación del maíz por *F. verticillioides* trasciende el daño agronómico, posicionándose como un desafío crítico de salud pública y animal debido a la síntesis de fumonisinas. Estudios recientes subrayan que estas micotoxinas no solo comprometen la productividad y sostenibilidad de la cadena agroalimentaria global (Hofstetter, 2025), sino que actúan como potentes agentes neurotóxicos y carcinogénicos. En seres humanos, la exposición crónica se ha vinculado con la interrupción del metabolismo de esfingolípidos, aumentando el riesgo de cáncer de esófago y defectos congénitos como los del tubo neural (Singh, 2025 ; Asiya *et al.* , 2026). Ante este panorama, el control racional del patógeno es imperativo para mitigar la acumulación de estas toxinas termoestables que persisten en los productos procesados.

Este hongo es un patógeno vegetal cuya transmisión se da por el suelo provocando pérdidas de calidad en el grano (Einloft *et al.* , 2021). Las cualidades comerciales y sanitarias de los cereales son importantes y determinan el destino del grano, ahora bien, la colonización de cereales por *F. verticillioides* se asocia frecuentemente con la acumulación de fumonisinas producidas en el campo o durante el almacenamiento, lo que representa una amenaza para su consumo como alimento tanto para personas como ganado (Ferrigo *et al.* , 2023).

El desarrollo de un sistema agrícola sostenible que pueda cubrir la demanda alimentaria de las generaciones futuras requiere de la integración de estrategias biológicas que respeten el medio ambiente y la salud (Jhariya *et al.* , 2019). El uso de microorganismos ya sea hongos como *Trichoderma spp.* o bacterias como *Bacillus spp.* se ha estudiado ampliamente, si bien su inoculación tiene un efecto positivo en diversos cultivos su combinación podría ofrecer un mayor potencial como promotores de crecimiento y biocontrol (Poveda, 2022).

En agricultura, estos microorganismos pueden promover el crecimiento vegetal, mejorar la tolerancia a estreses abióticos y actuar como agentes de control biológico de manera directa e indirecta (Zin y Badaluddin, 2020). Estos microorganismos son poseedores de una fuerte acción de antagonismo contra fitopatógenos como *Ralstonia solanacearum* y *Fusarium oxysporum* tanto en condiciones de laboratorio como invernadero (Cao, 2018). Dentro del control biológico se incluye también el uso de compuestos obtenidos de plantas, denominados extractos vegetales, se caracterizan por ser biodegradables y de baja toxicidad (Hernández *et al.* , 2007).

Larrea tridentata o también llamada gobernadora es poseedora de moléculas activas que presentan actividad biocida (Pañuelas *et al.* , 2015). Entre estas, un potente antioxidante identificado como ácido nordihidroguaiarético NDGA con propiedades fungicidas (Arteaga *et al.* , 2005). *Argemone mexicana* o chicalote, es una especie endémica de México rica en alcaloides, terpenoides, flavonoides, compuestos fenólicos, compuestos alifáticos de cadena larga y algunos compuestos aromáticos que se cree pueden generar actividad antifúngica (Soto, 2022).

Debido a su actividad biológica frente a hongos fitopatógenos, los metabolitos secundarios con propiedades fungicidas contenidos en las plantas se consideran una opción viable para su manejo (Madariaga-Mazón *et al.* , 2019). Por otro lado, mediante la alteración de procesos esenciales y estructurales, estas sustancias pueden promover el crecimiento vegetal, fortalecer la tolerancia frente a estreses abióticos y potenciar el rendimiento y la calidad del grano (Mrid, 2021).

En la investigación se esperó que, de los tratamientos utilizados, al menos uno tuviera una respuesta efectiva contra el hongo fitopatógeno *Fusarium verticillioides* tanto in vitro como en campo. El objetivo del estudio fue determinar la actividad antifúngica de *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* así como de los extractos hidroalcohólicos de *Larrea tridentata* y *Argemone mexicana* contra *Fusarium verticillioides* bajo condiciones de laboratorio y en campo.

Materiales y métodos

La investigación se realizó de junio 2024 a noviembre de 2025 en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en Saltillo, Coahuila, México. El sitio experimental está localizado en las coordenadas 25° 21' 20.7" latitud Norte 101° 01' 51.2" longitud oeste a una altitud de 1 742 m. El clima se clasifica como Cfb de acuerdo con Köppen. La temperatura media anual es de 16.4 °C y con una precipitación de 610 mm anuales.

Obtención de material biológico

La semilla de maíz híbrido Hernán Cortés fue proporcionada por el Instituto Mexicano del Maíz ubicado dentro de las instalaciones de la UAAAN, un material triple de grano blanco semidentado con adaptación para altitudes de 1 000 a 1 800 m. Este genotipo presenta un ciclo de madurez de 160-170 días y una altura de planta de 2.8-3 m. Se seleccionó específicamente por ser un material en fase de liberación para la región del Bajío Mexicano que ha mostrado susceptibilidad previa a *F. verticillioides*, lo que hace imperativo el desarrollo de estrategias de control biológico y botánico para mitigar el impacto de este patógeno. Por otra parte, las cepas de *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum* fueron tomadas de la colección de microorganismos del laboratorio de fitopatología de la universidad mencionada. Para el material botánico, en este caso las plantas de *Larrea tridentata* y *Argemone mexicana* se llevaron a cabo recolectas en la localidad La Encantada municipio de Saltillo, Coahuila.

Aislamiento e identificación del hongo fitopatógeno

El hongo fitopatógeno *F. verticillioides* fue aislado de la semilla híbrida Hernán Cortés sin tratamiento químico con síntomas de pudrición. A través de sus características morfológicas y fenotípicas fue identificado en medio de cultivo PDA y Clavel Agar (Leslie y Summerell, 2006).

Comprobación molecular de la cepa

La cepa de *F. verticillioides* se cultivó durante 12 días en medio PDA en incubación a 26 °C. La extracción de ADN genómico y la secuenciación de las regiones ITS1 e ITS4 se llevó a cabo por el laboratorio del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Las secuencias obtenidas fueron comparadas con las reportadas en la base de datos del NCBI del GenBank.

Obtención de extractos

Los extractos de *L. tridentata* y *A. mexicana* se obtuvieron a partir de tejido foliar recolectado en Coahuila, México. Las hojas fueron lavadas, desinfectadas y sometidas a secado para su posterior pulverización. De cada especie, se tomaron 49 g de material vegetal y se procesaron mediante agitación magnética constante a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) con metanol al 70% (v/v) durante siete días. Posteriormente, el macerado se centrifugó en tubos Falcon y se filtró para obtener el extracto crudo final.

Capacidad de inhibición in vitro

Se establecieron ensayos de confrontación dual con diez repeticiones, dónde el grado de antagonismo se determinó con la escala de (Bell *et al.* , 1982) para el caso de *T. harzianum* . Para *B. subtilis* con la ecuación $PI = 100 - [(Cr \cdot 100) / Rp]$. Donde: PI= inhibición del crecimiento del hongo; Cr= crecimiento micelial del hongo y Rp= radio de la placa (Hernández-Castillo *et al.* , 2008). Por otro lado, para el caso de *L. tridentata* y *A. mexicana* , se establecieron ensayos con medios envenenados por quintuplicado donde se abrió una ventana biológica y se evaluaron las concentraciones 750, 1 250, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000, 5 500, 6 000 y 6 500 (ppm) para poder determinar la CI_{90} de ambos extractos.

Evaluación de efectividad biológica en campo

El cultivo del maíz Hernán Cortés se desarrolló en condiciones de cielo abierto e infección natural del patógeno, en una superficie de 100 m² donde se trazaron surcos de 6 m de largo con distanciamiento de 74 cm entre surcos y 25 cm entre plantas, para ello con un día de antelación la semilla fue inoculada con los tratamientos utilizando como fijador carboximetil celulosa y colorante para su identificación, se realizó una segunda aplicación con 15 ml de los tratamientos cuando las plantas se encontraban en estado V2 (15 ml), una tercera en V4 (20 ml) dirigidas a la base del tallo y una cuarta en etapa de antesis mediante atomizaciones dirigida a estigmas receptivos.

Los tratamientos que se evaluaron fueron *T. harzianum* a una concentración de (1×10^8 conidios ml⁻¹), *B. subtilis* a (1×10^7 UFC), *A. mexicana* a una CI_{90} (13 000 ppm), *L. tridentata* a una CI_{90} (13 000 ppm), una combinación de *T. harzianum* (1×10^8 conidios ml⁻¹) y *B. subtilis* a (1×10^7 UFC) respectivamente y un testigo absoluto. El experimento se estableció en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. La incidencia de la enfermedad se evaluó en porcentaje (Rivas *et al.*, 2011).

Biológicos en la promoción del rendimiento

Durante el estadio de grano lechoso-masoso se determinó la altura de planta en cinco unidades por repetición, totalizando 20 plantas por tratamiento. Al concluir la madurez fisiológica, se procedió con la cosecha y el pesaje de las mazorcas de todas las repeticiones para la determinación del rendimiento.

Análisis estadístico

Las variables de inhibición in vitro, incidencia de la enfermedad, altura de planta y peso de la mazorca se sometieron a un análisis de varianza. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey (p# 0.05) utilizando el software SAS (versión 9.0).

Resultados y discusión

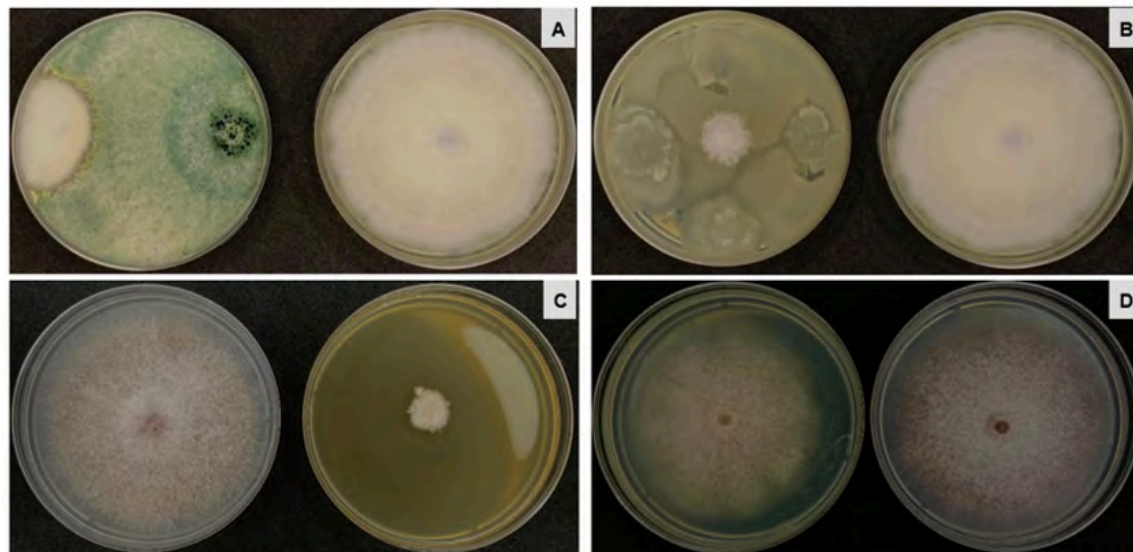
Aislamiento e identificación de cepa

Se realizó el aislamiento de *F. verticillioides* de semilla de maíz híbrido Hernán Cortés, además se identificó con base a la formación de macroconidios, microconidios en cadena y la ausencia de clamidosporas (Leslie y Summerell, 2006). La corroboración molecular evidenció un 99% con las secuencias de *F. verticillioides* contenidas en el Genbank, identificándose entonces como el agente causal de pudrición de raíces y tallos en etapas vegetativas, así como del grano en postcosecha, lo que coincide con reportes previos realizados por Gai *et al.* (2018); Czembor *et al.* (2019).

Capacidad antagonista in vitro

La actividad antifúngica de los tratamientos se presenta en la Figura 1 , donde se observa el crecimiento de *F. verticillioides* en cultivos duales evaluados a los 11 días de incubación. En cada panel se muestra el crecimiento del patógeno bajo la influencia del antagonista o extracto, contrastado con el crecimiento del testigo de manera adyacente.

Figura 1. Antagonismo in vitro de *Trichoderma harzianum* (A); *Bacillus subtilis* (B); *Larrea tridentata* (C); *Argemone mexicana* (D); sobre el crecimiento micelial de *F. verticillioides* en cultivos duales, evaluado a los 11 días de incubación.



La inhibición del crecimiento radial fue significativamente distinta entre tratamientos; la mayor eficacia se obtuvo con *B. subtilis* (86%), seguido por *T. harzianum* (82%) y el extracto de *L. tridentata* (82%) a una concentración de 6 500 ppm mientras que *A. mexicana* presentó la menor actividad inhibitoria con un 18% a 20 000 ppm. La acción antagonista de *B. subtilis* y *T. harzianum* se relaciona principalmente con su capacidad para competir eficazmente por el espacio y nutrientes en el entorno del patógeno. Además, pueden sintetizar diversos compuestos con actividad antimicrobiana y metabolitos volátiles.

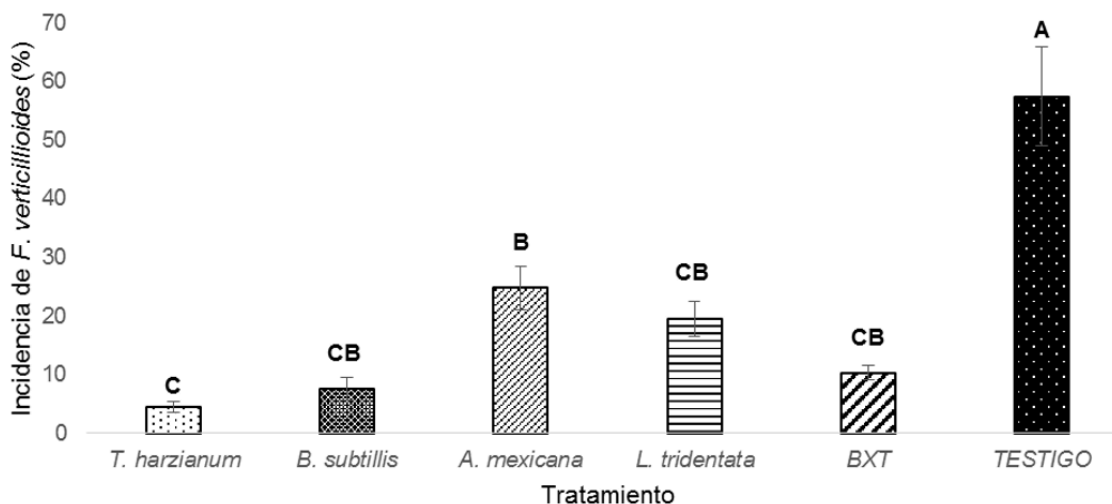
También son capaces de producir hormonas que modifican la fisiología de la planta y de activar mecanismos de resistencia sistémica (Pedraza *et al.* , 2020). O bien, pueden causar daño directo al patógeno por medio de micoparasitismo para el caso específico de *Trichoderma* (Elamathi *et al.* , 2018). Logrando así con el uso de microorganismos antagonistas, resultados sobresalientes como los reportados por Castro-del Ángel *et al.* (2020) .

En cuanto a los llamados fungicidas botánicos, numerosos estudios han demostrado que los fitoquímicos derivados de plantas tienen efectos fungicidas. Las plantas pueden considerarse un organismo perfecto con potencial para suministrar sustancias orgánicas que pueden clasificarse como metabolitos primarios (proteínas, carbohidratos y grasas) o metabolitos secundarios (terpenos, esteroides, antocianinas, antraquinonas, fenoles, alcaloides, etc.) (Bahandari *et al.*, 2021).

Efecto de biocontrol en campo

Los tratamientos con *T. harzianum* , *B. subtilis* y *L. tridentata* redujeron la incidencia del hongo fitopatógeno de manera significativa ($p < 0.0001$). *T. harzianum* presentó un 5% de incidencia mientras que *B. subtilis* 8%, *A. mexicana* 25% y *L. tridentata* un 10% en comparación con el testigo (57%) (Figura 2).

Figura 2. Incidencia de *F. verticillioides* en el grano cosechado del genotipo Hernán Cortés. Las barras superiores, son la desviación estándar de la media.



La susceptibilidad observada en el híbrido Hernán Cortés resaltó no solo el riesgo de pérdidas en el rendimiento, sino también la potencial acumulación de micotoxinas, como las fumonisinas, producidas por *F. verticillioides*. La reducción de la incidencia del hongo mediante el uso de *T. harzianum* y *B. subtilis* (o los extractos de *L. tridentata*) representa una medida preventiva esencial para garantizar la inocuidad alimentaria en materiales genéticos altamente productivos pero vulnerables.

La presencia de *F. verticillioides* en el cultivo de maíz no solo implica una reducción en el rendimiento y calidad del grano, sino que conlleva el riesgo latente de acumulación de micotoxinas, particularmente fumonisinas (FB₁ y FB₂). Estas toxinas están asociadas con patologías graves en animales y se consideran posibles carcinógenos para los seres humanos (Robledo Gutiérrez *et al.*, 2017).

En este contexto, los resultados obtenidos adquieren una relevancia mayor, ya que la disminución de la incidencia fúngica mediante el uso de agentes de biocontrol y extractos botánicos de *L. tridentata* sugiere una reducción indirecta en los niveles de micotoxinas. Lo anterior es crítico para el genotipo Hernán Cortés, cuya susceptibilidad a este patógeno podría comprometer la inocuidad del grano en las regiones donde será liberado comercialmente.

La eficacia observada en este trabajo mediante el uso de *T. harzianum* y extractos de *L. tridentata* no solo se limita a la supresión del crecimiento micelial, sino que proyecta un beneficio crucial en la inocuidad del grano. Al respecto, Gong *et al.* (2024) señalan que el control racional mediante agentes biológicos puede inhibir la expresión de los genes responsables de la síntesis de fumonisinas, lo que explicaría cómo la reducción de la incidencia fúngica se traduce en una menor carga tóxica.

Por su parte, los resultados coinciden con lo reportado por Wang *et al.* (2024), quienes sostienen que el uso de compuestos botánicos bioactivos es una estrategia eco-amigable capaz de comprometer la integridad del patógeno y mitigar la acumulación de FB₁. Integrar estas herramientas preventivas es, como afirman López-Nicora *et al.* (2025), la vía más efectiva para asegurar que el maíz cumpla con los estándares de salud pública y animal, evitando la persistencia de toxinas que afectan la seguridad alimentaria global.

Al respecto, Castro-del Ángel *et al.* (2020) reportó una formulación de tratamientos utilizando microorganismos benéficos capaces de controlar a *F. verticillioides* donde obtuvo reducciones significativas de la colonización, de igual manera Sebayang *et al.* (2021) obtuvo resultados similares utilizando bacterias del género *Bacillus* en combinación con extractos botánicos.

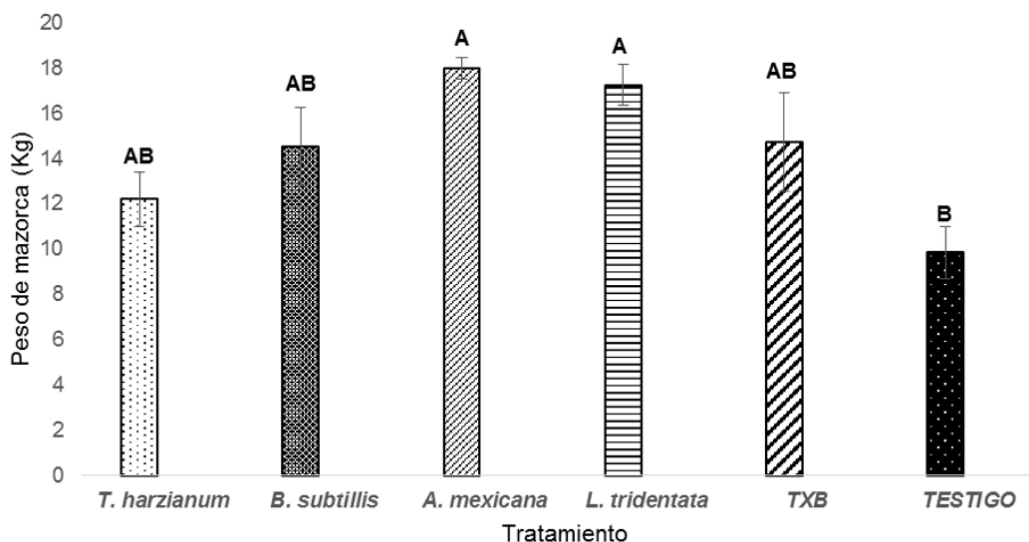
En adición antes mencionado, se puede decir que las cepas de los antagonistas estudiados y los extractos vegetales son promisorias para reducir la incidencia de *F. verticillioides*. La eficacia observada de los agentes de biocontrol se atribuye, en parte a la procedencia de las cepas. Al ser aislados resguardados en la colección de microorganismos de la UAAAN, estos cuentan con una caracterización previa que garantiza su viabilidad y agresividad contra fitopatógenos del suelo.

La capacidad de *B. subtilis* y *T. harzianum* para reducir la incidencia de *F. verticillioides* en el híbrido Hernán Cortés demuestra que estos microorganismos poseen una amplia plasticidad adaptativa, lo que permitió su aplicación exitosa en regiones distintas a las de su aislamiento original, como es el caso de las zonas evaluadas para este nuevo híbrido.

Biológicos en la promoción del rendimiento

El análisis en la actividad de los tratamientos contra el hongo fitopatógeno *F. verticillioides* mostró un incremento significativo del rendimiento, una variable que además se ve directamente afectada por su presencia, obteniendo pesos mayores en comparación con el testigo (Figura 3). Cabe destacar que el experimento se dirigió libre de fertilización química.

Figura 3. Peso de mazorca en kg del genotipo Hernán Cortés con los tratamientos evaluados. Las barras superiores, son la desviación estándar de la media.



El índice de área foliar resulta ser sumamente importante para la planta pues determina el área fotosintética y la acumulación de fotosintatos (Mendoza *et al.*, 2017). La fijación de los tratamientos a la semilla y las aplicaciones en posesmergencia influyó positivamente en el buen desarrollo de área foliar y altura de planta llegándose a notar plantas más vigorosas. La utilización de tratamientos botánicos o especies del género *Trichoderma* tienen la capacidad de mejorar visiblemente el desarrollo del área foliar, incluso, el número de frutos en especies hortícolas o el rendimiento en cosecha (Hassan *et al.*, 2021).

Por otro lado, la implementación de bacterias benéficas ha mostrado mejorar el crecimiento en cultivos de cereales como el trigo manifestando un incremento en la fotosíntesis y en la eficiencia del uso del agua lo que evidencia efectos positivos sobre la biomasa aérea (Li *et al.*, 2022).

Dentro de las bondades de los microorganismos antagonistas como *T. harzianum* y *B. subtilis* o extractos de plantas como los de *A. mexicana* y *L. tridentata* se encuentra la bioestimulación favoreciendo el crecimiento vegetal por lo que en las plantas manejadas con los tratamientos ya mencionados se observó un mejor desarrollo de la parte aérea obteniendo entonces una altura mayor (Cuadro 1) y mejor peso de mazorcas en comparación con el testigo.

Cuadro 1. Efecto de tratamientos biológicos en la altura de plantas de maíz bajo infección natural de *F. verticillioidea* .

Tratamiento	Altura de planta (m)	Desviación estándar	Incremento (%)
Testigo	2.39 c	0.054	-
<i>Trichoderma harzianum</i>	2.51 bc	0.047	16.3
<i>Bacillus subtilis</i>	2.59 abc	0.156	13
<i>Larrea tridentata</i>	2.7 ab	0.135	9.6
<i>Argemone mexicana</i>	2.78 a	0.01	8.4
<i>Bacillus</i> + <i>Trichoderma</i>	2.62 abc	0.12	5

Los valores promedio dentro de una columna seguidos de diferentes letras minúsculas difieren significativamente a $p \leq 0.05$ según la prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. El incremento en porcentaje se determinó tomando como referencia el valor promedio del testigo.

Se observaron diferencias notables ($p = 0.0006$) en el desarrollo longitudinal de las plantas de maíz en respuesta a los diferentes tratamientos biológicos tras la infección de *F. verticillioidea* . Todos los tratamientos evaluados superaron la altura del testigo, el cual presentó el crecimiento más bajo con 2.39 ± 0.054 m.

El tratamiento basado en el extracto de *A. mexicana* destacó como el más efectivo, alcanzando una altura máxima de 2.78 ± 0.01 m. Este resultado no solo representa el mayor incremento respecto al testigo (16.3%), sino que también mostró la mayor estabilidad experimental, evidenciada por la desviación estándar más baja del estudio (0.01). Por su parte, el extracto de *L. tridentata* mostró un comportamiento similar con una altura de 2.7 ± 0.135 m.

En cuanto a los agentes de control biológico microbianos, el consorcio *Bacillus* + *Trichoderma* (2.62 ± 0.12 m) superó ligeramente el desempeño individual de *B. subtilis* (2.59 ± 0.156 m) y *T. harzianum* (2.51 ± 0.047 m). Cabe señalar que, aunque los tratamientos con *Bacillus* (solo y en consorcio) incrementaron la altura, presentaron una mayor variabilidad en comparación con los extractos vegetales y el hongo antagonista *T. harzianum* .

Al respecto, el género *Bacillus* muestra propiedades bioquímicas como la solubilización de fosfatos, producción de ácido indolacético y actividad ACC deaminasa, asociadas con la promoción del crecimiento vegetal (Chávez-Ambríz *et al.* , 2016), en cuanto al género *Trichoderma* este efecto en la planta es una consecuencia de la actividad de potentes metabolitos de señalización fúngica difundidos en el suelo con actividad similar a las hormonas, incluidos compuestos indólicos como el ácido indol-3-acético (IAA) y compuestos orgánicos volátiles como isoprenoides sesquiterpénicos y etileno (Contreras-Cornejo *et al.* , 2024), para el caso de los extractos vegetales, la estimulación del crecimiento se ha relacionado con el contenido de flavonoides y las enzimas antioxidantes, proporcionando un suministro equilibrado de nutrientes para el crecimiento (Ei *et al.* , 2024).

Conclusiones

Se realizó el aislamiento e identificación de *F. verticillioidea* como agente causal de la pudrición de raíces, tallos y mazorca del cultivo de maíz. Los tratamientos de *T. harzianum* , *B. subtilis* y *L. tridentata* mostraron una alta actividad antagonista contra *F. verticillioidea* en cultivos duales durante los bioensayos in vitro.

La incidencia de *F. verticillioidea* se redujo considerablemente en el grano cosechado posterior al bioensayo en campo con los tratamientos *T. harzianum* , *B. subtilis* , *A. mexicana* , *L. tridentata* y la combinación entre *T. harzianum* y *B. subtilis* .

Los tratamientos con *T. harzianum* , *B. subtilis* , *A. mexicana* , *L. tridentata* y la combinación entre *T. harzianum* y *B. subtilis* tuvieron un efecto positivo en la inducción de crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz, así como una mejora en la expresión del potencial de rendimiento del híbrido Hernán Cortés donde el extracto de *A. mexicana* y *L. tridentata* resultaron significativamente superiores.

Bibliografía

- 1 Arteaga, S.; Andrade, C. and Cárdenas, R. 2005. *Larrea tridentata* (Creosote bush), an abundant plant of Mexican and US-American deserts and its metabolite nordihydroguaiaretic acid. *Journal of Ethnopharmacology*. 98(3):231-239. Doi: 10.1016/j.jep.2005.01.002.
- 2 Asiya, I. U.; Anas, Y.; Yazid, M. B.; Muhammad, B. T.; Hafsat, M. D.; Balkisu, M. M. and Hassan, S. 2026. Fumonisin toxicosis and its effects on human health: Sources, Detection, and Risk Mitigation. 13(15):1311-1324. Doi: 10.51244/IJRSI.2026.1315PH00014.
- 3 Bell, D. K.; Wells, H. D. and Markham, C. R. 1982. In vitro antagonism of *Trichoderma* species against six fungal plant pathogens. *Phytopathology*. 72(4):379-382.
- 4 Ben Mrid, R.; Benmrid, B.; Hafsa, J.; Boukcim, H.; Sobeh, M. y Yasri, A. 2021. Metabolitos secundarios como agentes bioestimulantes y bioprotectores: una revisión. *Science of the Total Environment*. 777(1):146204. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146204.
- 5 Bhandari, S.; Yadav, P. K. and Sarhan, A. T. 2021. Botanical fungicides; current status, fungicidal properties and challenges for wide scale adoption: a review. *Reviews in Food and Agriculture*. 2(2):63-68. Doi: 10.26480/rfna.02.2021.63.68.
- 6 Cao, Y.; Pi, H.; Chandrangu, P.; Li, Y.; Wang, Y.; Zhou, H.; Xiong, H.; Helmann, J. D. and Cai, Y. 2018. Antagonism of two plant growth promoting *Bacillus velezensis* isolates against *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum* . *Scientific Reports*. 8(1):4360. Doi: 10.1038/s41598-018-22782-z.
- 7 Castro-del Ángel, E.; Sánchez-Arizpe, A.; Galindo-Cepeda, M. E. y Vázquez-Badillo, M. E. 2020. Control biológico de la pudrición de mazorca en genotipos de maíz con especies de *Trichoderma* . *Revista BioCiencias*. 7(1):e965. Doi: 10.15741/revbio.07.e965.
- 8 Chávez-Ambríz, L. A.; Hernández-Morales, A.; Cabrera-Luna, J. A.; Luna-Martínez, L. y Pacheco-Aguilar, J. R. 2016. Aislados de *Bacillus* provenientes de la rizósfera de cactus incrementan la germinación y la floración en *Mammillaria spp.* (Cactaceae). *Revista Argentina de Microbiología*. 48(4):333-341. Doi: 10.1016/j.ram.2016.09.001.
- 9 Contreras-Cornejo, H. A.; Schmoll, M.; Esquivel-Ayala, B. A.; González-Esquivel, C. E.; Rocha-Ramírez, V. and Larsen, J. 2024. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiological Research*. 281(1):127621. Doi: 10.1016/j.micres.2024.127621.
- 10 Czembor, E.; Waśkiewicz, A.; Piechota, U.; Puchta, M.; Czembor, J. H. and Stępień, L. 2019. Differences in ear rot resistance and *Fusarium verticillioides* -produced fumonisin contamination between Polish currently and historically used maize inbred lines. *Frontiers in Microbiology*. 10(1):449. Doi: 10.3389/fmicb.2019.00449.
- 11 Ei, E.; Park, H. H. and Kuk, Y. I. 2024. Effects of plant extracts on growth promotion, antioxidant enzymes and secondary metabolites in rice (*Oryza sativa*) plants. *Plants*. 13(19):2727. Doi: 10.3390/plants13192727.
- 12 Einloft, T. C.; Hartke, S.; de Oliveira, P. B.; Silveira, S. P. and Gomes, D. R. 2021. Selection of rhizobacteria for biocontrol of *Fusarium verticillioides* on non-rhizospheric soil and maize seedlings roots. *European Journal of Plant Pathology*. 160(3):503-518. Doi: 10.1007/s10658-021-02260-2.

- 13 Elamathi, E.; Malathi, P.; Viswanathan, R. and Sundar, A. R. 2018. Expression analysis on mycoparasitism related genes during antagonism of *Trichoderma* with *Colletotrichum falcatum* causing red rot in sugarcane. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 27(3):351-361. Doi: 10.1007/s13562-018-0444-y.
- 14 Ferrigo, D.; Causin, R. and Dalla Costa, L. 2023. Pathogenic and genetic characterization of *Fusarium verticillioides* strains collected from maize and sorghum kernels. *Agriculture*. 13(1):105. Doi: 10.3390/agriculture13010105.
- 15 Figueroa-López, A. M.; Cordero-Ramírez, J. D.; Martínez-Álvarez, J. C.; López-Meyer, M.; Lizárraga-Sánchez, G. J.; Félix-Gastélum, R.; Castro-Martínez, C. and Maldonado-Mendoza, I. E. 2016. Rhizospheric bacteria of maize with potential for biocontrol of *Fusarium verticillioides*. *SpringerPlus*. 5(1):124. Doi: 10.1186/s40064-016-1780-x.
- 16 FIRA. 2024. Panorama Agroalimentario del maíz. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. <https://www.fira.gob.mx/>.
- 17 Gai, X.; Dong, H.; Wang, S.; Liu, B.; Zhang, Z.; Li, X. and Gao, Z. 2018. Infection cycle of maize stalk rot and ear rot caused by *Fusarium verticillioides*. *PLoS ONE*. 13(7):e0201588. Doi: 10.1371/journal.pone.0201588.
- 18 Gong, Y.; Zhang, L.; Wang, J. and Liu, R. 2024. Antagonistic activity of beneficial microorganisms against *Fusarium verticillioides* and their impact on Fumonisin B1 reduction in maize. *Toxins*. 16(2):85. DOI: 10.3390/toxins16020085.
- 19 González, A. y Ávila, J. F. 2014. El maíz en Estados Unidos y en México. Hegemonía en la producción de maíz transgénico y su influencia en México. *Argumentos. Estudios Críticos de la Sociedad*. 27(75):147-162.
- 20 González-Santos, R.; Hernández-Sandoval, L.; Hernández-Puente, K. N. y Ortega-Paczka, R. 2023. Distribución y caracterización ecogeográfica de maíces nativos de Querétaro, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 46(4):379-389.
- 21 Hassan, H. S.; Mohamed, A. A.; Feleafel, M. N.; Salem, M. Z. M.; Ali, H. M.; Akrami, M. and Abd-Elkader, D. Y. 2021. Natural plant extracts and microbial antagonists to control fungal pathogens and improve the productivity of zucchini (*Cucurbita pepo* L.) in vitro and in greenhouse. *Horticulturae*. 7(11):470. Doi: 10.3390/horticulturae7110470.
- 22 Hernández, L. A.; Bautista, B. S. y Velázquez, V. M. 2007. Prospectiva de extractos vegetales para controlar enfermedades postcosecha hortofrutícolas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(2):119-123.
- 23 Hernández-Castillo, F. D.; Lira-Méndez, K.; Gallegos-Morales, G.; Cepeda-Siller, M. y Rodríguez-Herrera, R. 2008. Uso de extractos vegetales y fungicidas biológicos para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* en tomate. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 26(2):95-100.
- 24 Hofstetter, U. 2025. Dsm-firmenich mycotoxin survey January to December 2024. *Aqua Culture Asia Pacific*. 21(2):42-46.
- 25 Jhariya, M. K.; Banerjee, A.; Meena, R. S. and Yadav, D. K. 2019. Sustainable agriculture, forest and environmental management. *Springer Nature*. 1-14 pp. Doi: 10.1007/978-981-13-2772-8.
- 26 Ji, C.; Chen, Z.; Kong, X.; Xin, Z.; Sun, F.; Xing, J.; Li, C.; Li, K.; Liang, Z. and Cao, H. 2022. Biocontrol and plant growth promotion by combined *Bacillus* spp. inoculation affecting pathogen and AMF communities in the wheat rhizosphere at low salt stress conditions. *Frontiers in Plant Science*. 13(1):104317. Doi: 10.3389/fpls.2022.1043171.
- 27 Leslie, J. F. and Summerell, B. A. 2006. *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing. Ames, Iowa, USA. 388 p. Doi: 10.1002/9780470278376.
- 28 López-Nicora, H. D.; Stewart, S. and Mitchell, T. K. 2025. Integrated management strategies to mitigate *Fusarium* ear rot and associated mycotoxins in corn. *Plant Disease*. 109(1):45-58.

- 29 Madariaga-Mazón, A.; Hernández-Alvarado, R. B.; Noriega-Colima, K. O.; Osnaya-Hernández, A. and Martínez-Mayorga, K. 2019. Toxicidad de metabolitos secundarios. Física y Ciencia Popular: Revista de Divulgación. 4(1):1-11.
- 30 Mendoza-Pérez, C.; Ramírez-Ayala, C.; Ojeda-Bustamante, W. y Flores-Magdaleno, H. 2017. Estimación de índice de área foliar y rendimiento de chile poblano cultivado en invernadero. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. 9(1):37-50. Doi: 10.5154/r.inagbi.2016.11.012.
- 31 Pedraza, L. A.; López, C. A. y Uribe-Vélez, D. 2020. Mecanismos de acción de *Bacillus spp.* (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. Acta Biológica Colombiana. 25(1):112-125. Doi: 10.15446/abc.v25n1.75138.
- 32 Peña, B. S. D. 2017. Hongos patógenos y micotoxinas en genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en la región central de México. Sociedades Rurales y Producción Agropecuaria. 3(1):1-12.
- 33 Peñuelas, O.; Arellano, M.; Vargas, I.; Lares, F.; Cantú, E. U.; Hernández#Rodríguez, S. E.; Gutiérrez, M. A. y Mungarro, C. 2017. Bioactividad in vitro de extractos de gobernadora (*Larrea tridentata*) sobre la inhibición de hongos poscosecha: *Alternaria tenuissima* , *Aspergillus niger* , *Penicillium polonicum* y *Rhizopus oryzae* . Polibotánica. 40(1):183#198. Doi: 10.18387/polibotanica.40.13.
- 34 Poveda, J. 2022. Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria in biocontrol. Biological Control. 170(1):105800. Doi: 10.1016/j.biocontrol.2022.105800.
- 35 Rivas-Valencia, P.; Virgen-Vargas, J.; Rojas-Martínez, I.; Cano-Salgado, A. y Ayala-Escobar, V. 2006. Evaluación de pudrición de mazorca de híbridos de maíz en valles altos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2(6):1477-1484.
- 36 Robledo-Gutiérrez, R. G.; Zambrano-Soria, M.; Bueno-Duran, A.; Navidad-Murrieta, M. S.; Ventura-Ramón, G. H. y Toledo-Ibarra, G. A. 2017. Determinación de fumonisinas en maíz de consumo humano y forrajero expedido en la ciudad de Tepic. Revista Bio Ciencias. 4(5):13.
- 37 Singh, P.; Kaur, J. and Kumar, R. 2025. Unveiling toxigenic *Fusarium* species causing maize ear rot: insights into fumonisin production potential. Frontiers in Plant Science. 16(1):1516644. Doi: 10.3389/fpls.2025.1516644.
- 38 Soto, I. H.; Maldonado, A. J.; Montiel, R. G. C.; Álvarez, G. A. y Hernández-Fuentes, A. D. 2022. *Argemone mexicana* contiene metabolitos secundarios que controlan hongos fitopatógenos. Boletín Científico Agropecuario del ICAP. 8(16):6-10. Doi: 10.29057/icap.v8i16.8398.
- 39 Suriani, S.; Sebayang, A.; Mirsam, H.; Pakki, S.; Azrai, M. and Muis, A. 2021. Control of *Fusarium verticillioides* on corn with a combination of *Bacillus subtilis* TM3 formulation and botanical pesticides. Saudi Journal of Biological Sciences. 28(12):7000-7005. Doi: 10.1016/j.sjbs.2021.07.085.
- 40 Wang, X.; Zhao, L.; Li, Y. and Chen, Q. 2024. Botanical extracts as an eco-Friendly strategy for controlling *Fusarium verticillioides* and mycotoxin contamination in maize. Plants. 13(4):512. Doi: 10.3390/plants13040512.
- 41 Zin, N. A. and Badaluddin, N. A. 2020. Biological functions of *Trichoderma spp.* for agriculture applications. Annals of Agricultural Sciences. 65(2):168-178. Doi: 10.1016/j.aos.2020.09.003.



Tratamientos biológicos y botánicos como estrategia dual de control y bioestimulación en maíz afectado por *Fusarium verticillioides*

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 February 2026
Date accepted: 01 May 2026
Publication date: 01 August 2026
Volume: 17
Issue: 5
Electronic Location Identifier: e4136
DOI: 10.29312/remexca.v17i5.4136

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Zea mays L.
antagonistas
biocontrol
bioestimulación
incidencia

Counts

Figures: 6
Tables: 2
Equations: 0
References: 41