Artículo científico



Evaluación de extractos vegetales del Desierto Chihuahuense contra Fusarium oxysporum en el cultivo de chile

Jesús Eduardo Ramírez-Méndez¹ (https://orcid.org/0000-0001-7044-3972)

Francisco Daniel Hernández-Castillo¹ (https://orcid.org/0000-0002-1096-0959)

Diana Jasso de Rodríguez¹ (https://orcid.org/0000-0002-0823-3605)

Omar Jiménez-Pérez² (https://orcid.org/0000-0002-1299-3607)

Rocío Crystabel López-González³ (https://orcid.org/0000-0001-8731-6099)

Marco A. Tucuch-Pérez^{4*} (https://orcid.org/0000-0002-6978-8145)

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología. Calzada Antonio Narro, núm. 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, México.

²Universidad Tecnológica de Escuinapa. Camino al Guasimal, s/n, col. Centro, Escuinapa de Hidalgo, Sinaloa, C. P. 82400, México.

³Instituto Tecnológico de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles. Ciudad Valles, San Luis Potosí, C. P. 79010, México.

⁴Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Botánica. Calzada Antonio Narro, núm. 1923, 14 Buenavista, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, México.

^{*}Autor para correspondencia: martp1216@gmail.com



Resumen

La marchitez causada por Fusarium oxysporum es una de las principales enfermedades que

afectan la producción de chile. En este estudio se evaluó la actividad antifúngica de extractos

metanólicos de hojas de Agave striata y tallos de Fouquieria splendens del Desierto

Chihuahuense sobre F. oxysporum bajo condiciones in vitro e in vivo en invernadero. La

identificación del hongo se realizó mediante claves taxonómicas y análisis molecular. La

actividad antifúngica de los extractos se determinó por la técnica de microdilución, con dosis

de 3.9 a 2 000 mg·L⁻¹, con el fin de establecer las concentraciones inhibitorias al 50 y 90 %.

Asimismo, se analizó el daño celular inducido en F. oxysporum y se evaluó la efectividad

antifúngica de los extractos en condiciones in vivo. Los resultados in vitro evidenciaron que

A. striata y F. splendens inhibieron el 100 % del crecimiento del hongo a concentraciones de

1 000 y 250 mg·L⁻¹, respectivamente. Ambos extractos indujeron vacuolización y

desorganización citoplasmática en las estructuras del hongo. En condiciones in vivo, el

extracto de F. splendens controló totalmente la enfermedad, mientras que A. striata redujo

significativamente su severidad. Los resultados confirman el potencial de estos extractos

como agentes de biocontrol sobre F. oxyporum en el cultivo de chile.

Palabras clave: fitoquímicos, biocontrol, fitopatógenos, antagonismo.

Recibido: 23/04/2025

Aceptado: 11/09/2025

Introducción

El cultivo de chile (Capsicum annuum L.) es de gran relevancia a nivel mundial debido a su

valor nutricional y económico. En México, la producción en 2023 alcanzó 3 681 061.47 t,

2



donde destacaron los estados de Chihuahua (22.72 %), Sinaloa (22.08 %), Zacatecas (13.52 %), San Luis Potosí (9.47 %) y Sonora (5.37 %) como los principales productores (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024). No obstante, al igual que otros cultivos, su producción se ve afectada por enfermedades fúngicas, como la marchitez causada por *Fusarium oxysporum*, un fitopatógeno del suelo capaz de sobrevivir durante varios años y de infectar a las plantas desde la etapa de plántula (Ahmad et al., 2023).

Las plantas infectadas con *F. oxysporum* presentan amarillamiento de las hojas inferiores, enrollamiento de los brotes apicales, marchitez y, finalmente, la muerte (Shaheen et al., 2021). Actualmente, el principal método de control contra este fitopatógeno es el uso de productos de síntesis química. Sin embargo, diversos estudios han reportado los efectos negativos de estos productos sobre el ambiente, además del riesgo de generar cepas resistentes (Zheng et al., 2022). Por ello, se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles que complementen o sustituyan los métodos convencionales. Entre estas alternativas destaca el uso de extractos vegetales con propiedades antifúngicas como una opción prometedora para el manejo sostenible de enfermedades en los cultivos (Hussain et al., 2023).

En México, algunas plantas del Desierto Chihuahuense destacan por sus propiedades medicinales, antimicrobianas y antifúngicas (Mohamed et al., 2017), ya que contienen fenoles, taninos, flavonoides y alcaloides (Rodríguez-Guadarrama et al., 2018). En este sentido, *Agave strita* y *Fouquieria splendens* se han reportado como fuentes de compuestos con actividad antibacteriana y fungicida (Ramírez-Méndez et al., 2024), lo cual sugiere su posible aplicación como agentes de biocontrol frente a hongos fitopatógenos.

Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que los extractos de *A. striata* y de *F. splendens* podrían inhibir el crecimiento micelial y causar alteraciones estructurales en *F. oxysporum*. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la actividad antifúngica de extractos metanólicos de hojas de *A. striata* y tallos de *F. splendens* del Desierto Chihuahuense sobre *F. oxysporum* bajo condiciones *in vitro* e *in vivo* en el cultivo de chile en invernadero.



Materiales y métodos

Aislamiento e identificación de Fusarium oxysporum

La recolección de raíces y tallos de plantas de chile serrano var. Platino con síntomas evidentes de marchitez se realizó en el municipio de Escuinapa, Sinaloa, México. El muestreo aleatorio incluyó seis plantas provenientes de un invernadero de producción convencional de 1 ha con 25 000 plantas establecidas. Las muestras se colocaron en bolsas de plástico y se transportaron en una hielera con hielo hasta el Laboratorio de Micología y Biotecnología del Departamento de Parasitología (LMBDP) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), donde las muestras se procesaron de inmediato para el aislamiento del hongo mediante la técnica de punta de hifa.

La colonia pura obtenida se caracterizó morfológicamente con base en las claves taxonómicas de Leslie y Summerell (2006), identificándose como *Fusarium* sp. Posteriormente, la identificación molecular se realizó en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). La extracción del ADN se realizó por el método CTAB descrito por Huang et al. (2018). La región ITS, comprendida entre las subunidades ribosomales 18S y 28S, se amplificó mediante PCR con los cebadores ITS1 e ITS4 (White et al., 1990). Los productos amplificados se secuenciaron por el método de terminación de cadena (Sanger), y las secuencias obtenidas se compararon con las disponibles en la base de datos del GenBank para confirmar la identidad del aislado.

Recolecta de las plantas



Las plantas de *A. striata* y *F. splendens* se recolectaron en el municipio de General Cepeda, Coahuila, México (25° 20' 27.13" N y 101° 27' 52.07" O, a 1 531 m s. n. m.) durante agosto de 2023, en la temporada de sequía. Se seleccionó un ejemplar adulto fisiológicamente maduro por cada especie. La recolecta se realizó durante la mañana, y se consideraron criterios de selección que incluyeron el desarrollo vegetativo óptimo y la ausencia de daños o síntomas de enfermedad (Ghimire et al., 2019). Las muestras se trasladaron al LMBDP de la UAAAN para su posterior procesamiento.

Preparación de los extractos

Los extractos se obtuvieron de acuerdo con la metodología de Jasso-de Rodríguez et al. (2015), con algunas modificaciones. Primero, se molieron y tamizaron las hojas de *A. striata* y los tallos de *F. splendens* para obtener un polvo con partículas de 0.5 a 1 mm. Se pesaron 42 g del material pulverizado, se colocaron en matraces de 500 mL y se agregaron 375 mL de metanol al 96 % en cada matraz. Los matraces se colocaron en una parrilla de agitación (Cimarec, Thermo Scientific, EUA) durante 72 h a 60 °C. Después, el metanol se eliminó mediante rotaevaporación (IKA RV 10, Artisan®, EUA) a 150 rpm y 70 °C. Finalmente, la fracción metanólica obtenida se vertió en recipientes de vidrio y se secó en una estufa (AR-130D, Arsa®, México) a 50 °C durante 72 h.

Actividad antifúngica de los extractos sobre Fusarium oxysporum



La actividad antifúngica se evaluó mediante la técnica de microdilución descrita por Tucuch-Pérez et al. (2020). Se utilizaron placas de poliestireno de 96 pozos, en las que se adicionaron 110 μL de medio líquido Sabouraud y 40 μL de cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio. La primera columna correspondió al testigo negativo, y a partir de la segunda columna (testigo positivo), además de lo anterior se incorporaron 10 μL de una suspensión de esporas de *F. oxysporum* (1 × 10⁶ conidios·mL⁻¹). Después de la tercera columna, se aplicaron los tratamientos con extractos vegetales en concentraciones de 3.9 a 2 000 mg·mL⁻¹.

Las microplacas se incubaron a 28 ± 2 °C durante 72 h y, posteriormente, se midió la absorbancia a 490 nm en un espectrofotómetro (Go 51119200, Thermo Scientific Multiskan, EUA). El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones (una microplaca por repetición). El porcentaje de inhibición se calculó con la fórmula propuesta por Moreno-Limón et al. (2011):

Porcentaje de inhibición =
$$\left(\frac{A-B}{C}\right) \times 100$$

donde A es la absorbancia del tratamiento, B es la absorbancia del testigo negativo y C es la absorbancia del testigo positivo.

Efecto de los extractos sobre las estructuras celulares de *Fusarium*oxysporum

El efecto de los extractos de A. striata y F. splendens sobre las estructuras celulares de F. oxysporum se evaluó según la metodología de Khalili et al. (2023), con algunas



modificaciones. Se mezclaron 50 μ L de una suspensión de *F. oxysporum* (1 × 10⁶ conidios·mL-¹) con una solución 1:1 (v/v) de medio Sabouraud y extracto, con las concentraciones inhibitorias al 90 % (CI₉₀) de *A. striata* (310.91 mg·L-¹) y *F. splendens* (233.89 mg L-¹) obtenidas previamente mediante bioensayos *in vitro* para asegurar un efecto antifúngico eficaz y evaluar los cambios celulares inducidos en el patógeno. Se incluyó un control negativo sin la adición de extractos. Los cultivos se incubaron a 25 ± 2 °C y 150 rpm por 7 días. Los cambios morfológicos se analizaron mediante microscopía óptica (40× y 100×). Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Evaluación in vivo de la efectividad biológica de los extractos

El ensayo *in vivo* se llevó a cabo en un invernadero del Departamento de Parasitología de la UAAAN (25° 21' 08.01" N y 101° 01' 38.00" O), en Saltillo, Coahuila, México, durante el ciclo primavera-verano de 2023. Durante el bioensayo, la temperatura ambiental promedio fue de 23 \pm 5 °C y la humedad relativa de 60 \pm 7 %, ambas registradas con un termohigrómetro digital (modelo 445815, Extech, EUA).

Trasplante e inoculación

Se utilizaron semillas de chile serrano variedad Tampiqueño 74. La germinación se realizó en charolas de unicel con turba (*peat moss*) como sustrato. A las dos semanas, las plántulas se trasplantaron a macetas de 2 L que contenían un sustrato compuesto por 45 % de suelo pasteurizado, 45 % de *peat moss* y 10 % de perlita. La inoculación se realizó según la metodología de Silva-Lima et al. (2019), con algunas modificaciones. Las raíces apicales se cortaron transversalmente y se sumergieron en una suspensión de *F. oxysporum* (1 × 10⁶ conidios·mL⁻¹) por 5 min; posteriormente, se trasplantaron a bolsas de plástico. Las plantas



se mantuvieron a 60 ± 7 % de humedad relativa, se fertilizaron con una solución de Steiner para solanáceas y se regaron con agua corriente.

Aplicación de los tratamientos

Los tratamientos se establecieron bajo diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron: T1) control positivo inoculado con *F. oxysporum* sin tratamiento, T2) control negativo sin inoculación ni tratamiento, T3) extracto de hojas de *A. striata* (3 10.91 mg·L⁻¹) y T4) extracto de tallos de *F. splendens* (233.89 mg·L⁻¹). Los extractos se aplicaron con base en la CI₉₀ obtenida en los bioensayos *in vitro*, mediante aplicaciones tipo *drench* y foliares cada siete días durante seis semanas.

Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron la incidencia, la severidad y los parámetros morfométricos de las plantas, incluidos el peso fresco y seco de la biomasa aérea y radicular, la altura, la longitud de la raíz, el diámetro del tallo, el índice relativo de clorofila (medido con un SPAD), así como el peso, el número y el tamaño de frutos. La incidencia se calculó como el porcentaje de plantas con síntomas visibles de marchitez respecto al total evaluado, mediante la siguiente fórmula:

$$Incidencia = \frac{N\'umero\ de\ plantas\ enfermas}{Total\ de\ plantas} \times 100$$

La severidad, referida al grado o intensidad del daño causado por la enfermedad en cada planta, se evaluó de acuerdo con la escala de Velarde-Félix et al. (2018), con algunas modificaciones: 0 = planta sin síntomas, 1 = necrosis leve en xilema sin síntomas foliares, 2



= amarillamiento leve de hojas y necrosis del xilema hasta los cotiledones, 3 = planta atrofiada con amarillamiento severo y necrosis por encima de los cotiledones, 4 = planta muerta.

Análisis estadístico

Las concentraciones inhibitorias al 50 y 90 % (CI₅₀ y CI₉₀) en los ensayos *in vitro* se determinaron mediante un análisis probit. En los ensayos *in vivo*, los datos se sometieron a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico SAS ver. 9.0 (SAS Institute, 2000).

Resultados y discusión

Aislamiento e identificación de F. oxysporum

El hongo *F. oxysporum* se aisló y se identificó mediante sus características distintivas, como la presencia de macroconidios, microconidios y clamidosporas (Leslie y Summerell, 2006). La identificación molecular confirmó su correspondencia con *F. oxysporum*, al mostrar un 100 % de cobertura y similitud con los números de acceso MT530269.1 y MT530243.1 del



GenBank. La secuencia obtenida se depositó en el GenBank con el número de acceso PQ571194.

Efectividad antifúngica de los extractos sobre Fusarium oxysporum

Los extractos metanólicos de hojas de *A. striata* y tallos de *F. splendens* mostraron actividad antifúngica significativa contra *F. oxysporum*, al inhibir el 100 % del crecimiento micelial a concentraciones de 1 000 y 250 mg·L⁻¹, respectivamente (Figura 1). Por otro lado, las CI₅₀ y CI₉₀ fueron de 81.83 y 310.91 mg·L⁻¹ para *A. striata*, y de 71.97 y 233.89 mg·L⁻¹ para *F. splendens* (Cuadro 1).

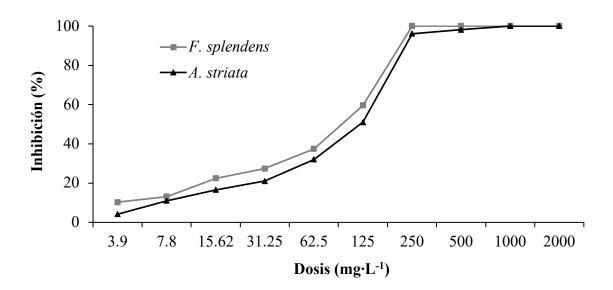


Figura 1. Efecto inhibitorio de diferentes concentraciones de extractos metanólicos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* sobre el crecimiento de *Fusarium oxysporum*, determinado por el método de microdilución.



Cuadro 1. Concentraciones inhibitorias al 50 y 90 % (CI₅₀ y CI₉₀, respectivamente) de los extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* sobre *Fusarium oxysporum* en condiciones *in vitro*.

Extractos	CI ₅₀ (mg·L ⁻¹)	CI ₉₀ (mg·L ⁻¹)
Agave striata	81.83 a	310.91 a
Fouquieria splendens	71.97 a	233.89 b

Valores seguidos de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p > 0.05).

No se han reportado estudios específicos sobre la actividad antifúngica de *A. striata* y *F. splendens* sobre *F. oxysporum*. No obstante, extractos de otras especies del género *Agave* han demostrado su capacidad para inhibir *Fusarium* spp. (Almazán-Morales et al., 2022; Silva et al., 2022). Además, otras plantas del Desierto Chihuahuense, como *Larrea tridentata*, han mostrado actividad antifúngica contra *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, con una inhibición de 63.2 % al aplicar 1 000 mg·L⁻¹ (Lira-Saldivar et al., 2006). De forma similar, Ruiz-Bustos et al. (2009) registraron una inhibición de 42 % contra *F. verticillioides* al utilizar 500 μg·mL⁻¹ de extractos metanólicos de *Jatropha cuneata*.

Por su parte, Jasso-de Rodríguez et al. (2007) reportaron inhibiciones del 100 % en *F. oxysporum* con extractos de hojas de *Flourensia cernua*, *F. retinophylla* y *F. microphylla* a concentraciones de 1 500 μL·L·l. Peñuelas-Rubio et al. (2017) evidenciaron la inhibición completa del crecimiento micelial de *F. oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* al aplicar 1 000 mg L·l de extractos de *L. tridentata*. Tucuch-Pérez et al. (2020) observaron que los extractos de *Lippia graveolens*, *Carya illinoinensis* y *A. lechuguilla* inhiben entre el 40 y 100 % el crecimiento de *F. oxysporum*. En dicho estudio, los extractos de raíces de *A. lechuguilla* alcanzaron una inhibición total a partir de 250 mg L·l, valor comparable al obtenido con *F. splendens* en el presente trabajo, pero inferior al observado para *A. striata*.



Efecto de los extractos sobre las estructuras celulares de *Fusarium*oxysporum

Ambos extractos generaron alteraciones morfológicas sobre las estructuras celulares de *F. oxysporum*, evidenciadas por vacuolización citoplasmática y desorganización estructural en conidios y micelio (Figura 2). En el control absoluto, las hifas y conidios conservaron su integridad y germinaron normalmente. Estos efectos se observaron con las CI₉₀ de cada extracto (310.91 mg·L⁻¹ para *A. striata* y 233.89 mg·L⁻¹ para *F. splendens*).

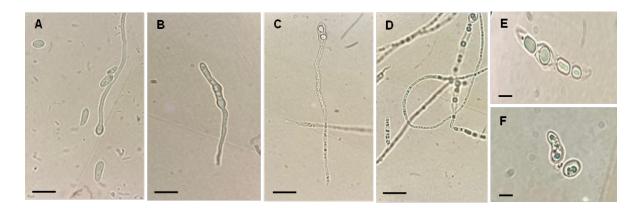


Figura 2. Efecto de los extractos metanólicos sobre el micelio y los conidios de *Fusarium oxysporum*: A y B) control absoluto; C y E) *Fouquieria splendens*; D y F) *Agave striata*. Imágenes obtenidas con objetivos de 40× y 100×. Barras de escala: A, B, C, D = 50 μm; E y F = 20 μm.

La actividad antifúngica observada podría estar asociada con la presencia de compuestos con propiedades antifúngicas previamente identificados en ambos extractos, como la quercetina en *A. striata* y *F. splendens*, la pinocembrina en *A. striata* y el kaempferol en *F. splendens* (Ramírez-Méndez et al., 2024). Asimismo, se ha documentado que los compuestos fenólicos inducen alteraciones estructurales en las células fúngicas, incluyendo colapso y contracción celular (Hong-Sheng et al., 2014). De igual manera, Khalili et al. (2023) y Mohamed et al.



(2017) reportaron que los extractos de *Pulicaria incisa* y *P. crispa*, ricos en compuestos polifenólicos, provocaron vacuolización citoplasmática, formación de autofagosomas y daños en orgánulos celulares esenciales en *F. oxysporum* y *F. solani*.

Dichos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en este estudio, donde los extractos de *A. striata* y *F. splendens* también provocaron daños estructurales en *F. oxysporum*. Esto sugiere un mecanismo común de acción antifúngica basado en la inducción de daño celular, lo cual fortalece la evidencia sobre la eficacia de los compuestos bioactivos presentes en ambas especies evaluadas para el control de hongos fitopatógenos.

Actividad biológica in vivo de los extractos contra Fusarium oxysporum

Los resultados de la incidencia y severidad de la marchitez en plantas de chile inoculadas con *F. oxysporum* se presentan en el Cuadro 2. El control positivo mostró una incidencia del 100 % y la mayor severidad (2.78). En contraste, las plantas tratadas con el extracto de *A. striata* presentaron una incidencia del 33 % y severidad de 0.77, mientras que las tratadas con *F. splendens* y el control negativo no mostraron síntomas de enfermedad, sin diferencias estadísticas entre ambos tratamientos.

Cuadro 2. Incidencia y severidad de plantas de chile serrano inoculadas con *Fusarium* oxysporum y tratadas con extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens*.

Tratamientos	Severidad	Incidencia		
Tratamientos	Escala	Plantas enfermas (%)		
Control positivo	$2.78 \pm 0.39 \; a$	100 a		
Control negativo	$0.00 \pm 0.00 \; c$	0 b		
Extracto de Agave striata	$0.77\pm0.24\ b$	33.33 ab		

Extracto de *Fouquieria splendens*

 $0.00 \pm 0.00 \; c$

0 b

Media \pm desviación estándar. Valores seguidos de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p > 0.05).

En cuanto a los parámetros morfométricos (Cuadro 3), el extracto de F. splendens indujo el mayor índice relativo de clorofila en el follaje (40.27 ± 0.9 unidades SPAD), seguido del control negativo (38.47 ± 1.21 unidades SPAD), sin diferencias significativas (p > 0.05). Asimismo, el follaje de las plantas tratadas con F. splendens presentó un peso fresco de 4.38 ± 0.23 g y un peso seco de 1.26 ± 0.06 g, ubicándose en un rango medio con respecto a ambos controles. Por su parte, A. striata mostró valores similares en la mayoría de los parámetros, con una longitud de tallo de 28.50 ± 3.56 cm y peso fresco de follaje de 3.46 ± 0.87 g.

Cuadro 3. Parámetros morfométricos en plantas de chile serrano inoculadas con *Fusarium oxysporum* y tratadas con extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* bajo condiciones de invernadero.

Tratamientos	LT	LR	DT	PFF	PSF	PFR	PSR	C (índice
	(cm)	(cm)	(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	SPAD)
Control or sition	17.07 ±	17.12	3.17 ±	1.59 ±	0.36 ±	0.59 ±	0.17 ±	29.23 ±
Control positivo	1.12 b	± 2.3 c	0.28 b	0.21 c	0.05 e	0.09 f	0.03 e	2.01 c
Control magative	$32.67 \pm$	33.93	$4.75 \pm$	5.22 ±	1.91 ±	$4.98 \pm$	$0.87 \pm$	$38.47 \pm$
Control negativo	2.12 a	$\pm 2.8 a$	0.32 a	0.48 a	0.17 a	0.52 a	0.07 a	3.20 ab
Extracto de Agave	$28.50 \pm$	23.80	$3.84 \pm$	$3.46 \pm$	$0.75 \pm$	$1.64 \pm$	$0.44 \pm$	$37.50 \pm$
striata	2.45 a	$\pm 2.1 b$	0.3 ab	0.37 b	0.09 b	0.21 e	0.06 cd	2.85 ab
Extracto de	$30.80 \pm$	27.17	$4.49 \pm$	$4.38 \pm$	1.26 ±	$3.54 \pm$	$0.64 \pm$	$40.27 \pm$
Fouquieria splendens	2.76 a	$\pm~2.6~b$	0.34 a	0.4 ab	0.13 b	0.33 b	0.05 b	3.10 a

LT: longitud de tallo; LR: longitud de raíz; DT: diámetro de tallo; PFF: peso fresco del follaje; PSF: peso seco del follaje; PFR: peso fresco del sistema radicular; PSR: peso seco del sistema radicular; C: clorofila en follaje. Media \pm desviación estándar. Valores seguidos de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p > 0.05).



Respecto a la producción de frutos (Cuadro 4), el control negativo presentó los mejores resultados, con un promedio de 2.33 ± 0.13 frutos por planta, peso total de 6.70 ± 2.05 g y tamaño de 5.83 ± 0.57 cm. Estos valores fueron estadísticamente (p > 0.05) similares a los obtenidos con el tratamiento de *F. splendens*, el cual produjo en promedio 1.33 ± 0.58 frutos con un peso de 5.23 ± 1.41 g y longitud de 4.78 ± 1.58 cm. En contraste, *A. striata* y el control positivo no produjeron frutos, lo que sugiere un posible efecto fitotóxico del extracto sobre la fructificación. Aunque no existen reportes previos sobre efectos negativos de extractos vegetales en la fase reproductiva del chile, se ha documentado que ciertos metabolitos secundarios pueden afectar la germinación y el crecimiento de plántulas (Céspedes et al., 2006), lo cual se podría extenderse a etapas fenológicas posteriores.

Cuadro 4. Parámetros de frutos en plantas de chile serrano inoculadas con *Fusarium* oxysporum y tratadas con extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* bajo condiciones de invernadero.

Tratamientos	Número de frutos	Peso de frutos (g)	Tamaño de frutos (cm)
Control positivo	$0.00\pm0.0\;b$	$0.00\pm0.0\;b$	$0.00\pm0.0\;b$
Control negativo	$2.33\pm0.58\;a$	$6.70\pm0.73~a$	5.83 ± 0.54 a
Extracto de Agave striata	$0.00 \pm 0.0 \; b$	$0.00 \pm 0.0 \; b$	$0.00 \pm 0.0 \; b$
Extracto de Fouquieria	$1.33\pm0.47~ab$	5.23 ± 0.66 a	$4.78 \pm 0.49 \; ab$
splendens			

Media \pm desviación estándar. Valores seguidos de letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, p > 0.05).

Diversos estudios han demostrado la efectividad de extractos vegetales en el control de *F. oxysporum* bajo condiciones de invernadero. Bowers y Locke (2000) reportaron reducciones de hasta 99.9 % en la población del patógeno y obtuvieron entre 80 y 100 % de plantas sanas bajo condiciones de invernadero al aplicar extractos de pimienta/mostaza, casia y clavo al 10 %. De igual manera, Tucuch-Pérez et al. (2021) evaluaron extractos vegetales de *A*.



lechuguilla (250 mg·L⁻¹) y *L. graveolens* (125 mg·L⁻¹) para el control de *F. oxysporum* en tomate y observaron reducciones en la incidencia y severidad de la enfermedad, además de favorecer el desarrollo morfométrico de las plantas. Estos hallazgos coinciden con los del presente estudio, donde el extracto de *F. splendens* presentó eficacia antifúngica y efectos positivos en el desarrollo de las plantas.

Conclusiones

Los extractos de *A. striata* y *F. splendens* mostraron una alta efectividad antifúngica contra *F. oxysporum* en condiciones *in vitro*, lo cual confirma la hipótesis planteada sobre su eficacia. El análisis microscópico reveló que ambos extractos inducen vacuolización citoplasmática y desorganización estructural en el micelio y los conidios del patógeno. En condiciones de invernadero, el extracto de *F. splendens* proporcionó una protección completa, al mantener el 100 % de las plantas de chile serrano libres de síntomas, mientras que *A. striata* redujo significativamente la severidad de la enfermedad. Los parámetros morfométricos evidenciaron un mayor desarrollo vegetal en las plantas tratadas con *F. splendens*. No obstante, se observó una disminución en la cantidad de frutos en las plantas tratadas con *A. striata*, lo que sugiere un posible efecto fitotóxico. Por ello, es necesario profundizar en la evaluación de su seguridad y en la determinación de dosis óptimas que permitan su aplicación sostenible en el manejo de *F. oxysporum* en chile serrano.

Referencias

Ahmad, N., Abbas, A., Shamsullah, S., Jabran, M., & Ali, M. A. (2023). *Fusarium* wilt disease of chili: pathogen, its mechanism of infection, eradication, and impacts. *Phytopathogenom Disease Control*, 2(2), 95-110. https://doi.org/10.22194/Pdc/2.1024

- Almazán-Morales, A., Moreno-Godínez, M. E., Hernández-Castro, E., Vázquez-Villamar, M., Mora-Aguilera, J. A., Cabrera-Huerta, E., & Álvarez-Fitz, P. (2022). Phytochemical profile and *in vitro* activity of *Agave angustifolia* and *A. cupreata* extracts against phytopathogenic fungi. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 40(2), 169-187. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2202-6
- Bowers, J. H., & Locke, J. C. (2000). Effect of botanical extracts on the population density of *Fusarium oxysporum* in soil and control of *Fusarium* wilt in the greenhouse. *Plant Disease*, 84(3), 300-305. https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.3.300
- Céspedes, C. L., Marín, J. C., Domínguez, M., Ávila, J. G., & Serrato, B. (2006). Plant growth inhibitory activities by secondary metabolites isolated from Latin American flora. *Advances in Phytomedicine*, 2, 373-410. https://doi.org/10.1016/S1572-557X(05)02021-0
- Hong-Sheng, W., Xiao-Dong, Z., Xue, S., Ya-Dong, L., Ming-Yan, W., Xiao-Xia, S., Da-Lu, G., Wei-Zhong, W., & Chuan-Wan, W. (2014). *In vitro* responses of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* to phenolic acids in decaying watermelon tissues. *Phytochemistry Letters*, 8, 171-178. https://doi.org/10.1016/j.phytol.2013.08.013
- Ghimire, B. K., Seo, J. W., Kim, S. H., Ghimire, B., Lee, J. G., Yu, C. Y., & Chung, I. M. (2021). Influence of harvest time on phenolic and mineral profiles and their association with antioxidant and cytotoxic effects of *Atractylodes japonica* Koidz. *Agronomy*, 11(7), 1327. https://doi.org/10.3390/agronomy11071327
- Huang, X., Duan, N., Xu, H., Xie, T. N., Xue, Y. R., & Liu, C. H. (2018). CTAB-PEG DNA extraction from fungi with high contents of polysaccharides. *Molecular Biology*, *52*(4), 621-628. https://doi.org/10.1134/S0026893318040088
- Hussain, S., Aslam, M. N., Mehmood, B., Zafat, L., Shafiqe, S., Qureshi, F. F., Khan, Y. S., Ayub, M., & Mushtaq, S. (2023). Antimycotic properties of potentials botanical crude extracts and bio-control agent against *Fusarium* wilt of chili caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici*. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 2(3), 213-221. https://doi.org/10.55627/agrivet.002.03.0368

- Jasso-de Rodríguez, D., Hernández-Castillo, F. D., Angulo-Sánchez, J. L., Rodríguez-García, R., Villarreal-Quintanilla, J. A., & Lira-Saldivar, R. H. (2007). Antifungal activity in vitro of Flourensia spp. extracts on Alternaria sp., Rhizoctonia solani, and Fusarium oxysporum. Industrial Crops and Products, 25(2), 111-116. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.08.007
- Jasso-de Rodríguez, D., Trejo-Gonzáles, F. A., Rodríguez-García, R., Díaz-Jiménez, M. L. V., Sáenz-Galindo, A., Hernández-Castillo, F. D., Villarreal-Quintanilla, J. A., & Peña-Ramos, F. M. (2015). Antifungal activity in vitro of Rhus muelleri against Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici. Industrial Crops and Products, 75, 150-158. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.048
- Khalil, A. M., Saleh, A. M., Abo El-Souad, S. M., & Mohamed, M. S. (2023). Plants from a semi-arid environment as a source of phytochemicals against *Fusarium* crown and foot rot in zucchini. *AMB Express*, *13*(6), 1-12. https://doi.org/10.1186/s13568-023-01515-0
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing.

 https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Yu3cBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&ots=3M261GRlXv&sig=rV5rJNPkokevdsGguqqXmP0USYU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Lira-Saldivar, R. H., Hernández-Suárez, M., & Hernández-Castillo, F. D. (2006). Activity of *Larrea tridentata* (DC) Coville L. extracts and chitosan against fungi that affect horticultural crops. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2), 211-216. https://www.redalyc.org/pdf/609/60912212.pdf
- Mohamed, M. S., Saleh, A. M., Abdel-Farid, I. B., & El-Naggar, S. A. (2017). Growth, hydrolases and ultrastructure of *Fusarium oxysporum* as affected by phenolic rich extracts from several xerophytic plants. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *141*, 57-64. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.11.007
- Moreno-Limón, S., González-Solís, L. N., Salcedo-Martínez, S. M., Cárdenas-Ávila, M. L., & Perales-Ramírez, A. (2011). Efecto antifúngico de extractos de gobernadora (*Larrea*



- tridentata L.) sobre la inhibición in vitro de Aspergillus flavus y Penicillium sp. Polibotánica, 32, 193-205.
- https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682011000200012
- Peñuelas-Rubio, O., Arellano-Gil, M., Verdugo-Fuentes, A. A., Chaparro-Encinas, L. A., Hernández-Rodríguez, S. E., Martínez-Carrillo, J. L., & Vargas-Arispuro, I. D. C. (2017). Larrea tridentata extracts as an ecological strategy against Fusarium oxysporum radicis-lycopersici in tomato plants under greenhouse conditions. Revista Mexicana de Fitopatología, 35(3), 360-376. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1703-3
- Ramírez-Méndez, J. E., Hernández-Castillo, F. D., Gallegos-Morales, G., Jasso-Cantú, D., Arredondo-Valdés, R., & Tucuch-Pérez, M. A. (2024). Efectividad biológica de extractos de *Agave striata* y *Fouquieria splendens* sobre *Pythium aphanidermatum* y *Rhizoctonia solani in vitro. Revista Mexicana de Fitopatología*, 42(4), 40. https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-23
- Rodríguez-Guadarrama, A. H., Guevara-González, R. G., de Jesús, R. G. S., & Feregrino-Pérez, A. A. (2018). Antifungal activity of Mexican endemic plants on agricultural phytopathogens: a review. *XIV International Engineering Congress (CONIIN)*, 1-11. https://doi.org/10.1109/CONIIN.2018.8489793
- Ruiz-Bustos, E., Velazquez, C., Garibay-Escobar, A., García, Z., Plascencia-Jatomea, M., Cortez-Rocha, M. O., Hernández-Martínez, J., & Robles-Zepeda, R. E. (2009). Antibacterial and antifungal activities of some Mexican medicinal plants. *Journal of Medicinal Food*, 12(6), 1398-1402. https://doi.org/10.1089/jmf.2008.0205
- SAS Institute (2000). SAS/STAT® version 9.0 user's guide [software]. SAS Institute Inc.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Cierre de la producción agrícola. SIAP. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Shaheen, N., Khan, U. M., Azhar, M. T., Tan, D. K., Atif, R. M., Israr, M., Yang, S. H., Gyuhwa, C. & Rana, I. A. (2021). Genetics and genomics of *Fusarium* wilt of chilies: A review. *Agronomy*, 11(11), 2162. https://doi.org/10.3390/agronomy11112162



- Silva, A. R., Kettner, M. G., Lima, M. L., Oliveira, L. G., Araujo, E. R., & Costa, A. F. (2022). Controle alternativo de *Fusarium oxysporum* com a utilização de extratos vegetais. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 27(1), 1-6. https://doi.org/10.12661/pap.2021.007
- Silva-Lima, L. K., de Jesús, O. N., Soares, T. L., Santos-de Oliveira, S. A., Haddad, F., & Girardi, E. A. (2019). Water deficit increases the susceptibility of yellow passion fruit seedlings to *Fusarium* wilt in controlled conditions. *Scientia Horticulturae*, 243, 609-621. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.017
- Tucuch-Pérez, M. A., Arredondo-Valdés, R. & Hernández-Castillo, F. D. (2020). Antifungal activity of phytochemical compounds of extracts from Mexican semi-desert plants against *Fusarium oxysporum* from tomato by microdilution in plate method. *Nova Scientia*, 12(25), 1-19. https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2345
- Tucuch-Pérez, M. A., Bojórquez-Vega, J. J., Arredondo-Valdés, R., Hernández-Castillo, F.
 D., & Anguiano-Cabello, J. C. (2021). Actividad biológica de extractos vegetales del semidesierto mexicano para manejo de *Fusarium oxysporum* de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2), e2745. https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2745
- Velarde-Félix, S., Garzón-Tiznado, J. A., Hernández-Verdugo, S., López-Orona, C. A., & Retes-Manjarrez, J. E. (2018). Aparición de Fusarium oxysporum causante de marchitez en pimiento en México. Revista Canadiense de Patología Vegetal, 40(2), 238-247. https://doi.org/10.1080/07060661.2017.1420693
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: M. A. Innis, D. H. Gelfand, J.J. Sninsky, & T. J. White (Eds.), PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications (pp. 315-322). Academic Press Inc. https://books.google.es/books?id=Z5jwZ2rbVe8C&pg=PA315
- Zheng, Z., Liu, H., Shi, Y., Liu, Z., Teng, H., Deng, S., Wei, L., Wang, Y., & Zhang, F. (2022). Comparative transcriptome analysis reveals the resistance regulation mechanism and fungicidal activity of the fungicide phenamacril in *Fusarium*



oxysporum. Scientific Reports, 12(1), 11081. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15188-5