

**COMPATIBILIDAD DE TRICHODERMA Y METARHIZIUM CON TEBUCONAZOL
PARA INHIBIR FUSARIUM IN VITRO
COMPATIBILITY OF TRICHODERMA AND METARHIZIUM WITH TEBUCONAZOLE
FOR IN VITRO INHIBITION OF FUSARIUM**

Autores: ¹José Leonidas Guevara Acevedo, ²Jorling María Castillo Rodríguez y ³Norman Isaac Pacheco Pichardo.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-9543-5797>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1626-7043>

³ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3138-3613>

¹E-mail de contacto: guevaleo@gmail.com

²E-mail de contacto: jmaria.castillo@unflep.edu.ni

³E-mail de contacto: pachnor28@gmail.com

Afiliación: ^{1*2*3}Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda, (UNFLEP), (Nicaragua).

Artículo recibido: 2 de Septiembre del 2026.

Artículo revisado: 22 de Octubre del 2026.

Artículo aprobado: 22 de Octubre del 2026.

¹Ingeniero Agropecuario, graduado de la Universidad Católica Agropecuaria del Trópico Seco (UCATSE), (Nicaragua). Maestrante de la Maestría en Sanidad Vegetal, en la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), (Nicaragua).

²Ingeniera Agropecuaria, graduada de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (FAREM-Esteli), (Nicaragua). Licenciada en Bioanálisis Clínico, graduada de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (FAREM-Esteli), (Nicaragua). Magíster en Pedagogía, con mención en Docencia Universitaria, graduada la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (FAREM-Esteli), (Nicaragua). Docente y directora de Gestión de la Calidad, de la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), (Nicaragua).

³Estudiante de grado de Ingeniería Agronómica, en la Universidad Nacional Agraria, Managua, (Nicaragua).

Resumen

El manejo de hongos fitopatógenos mediante fungicidas químicos puede afectar también a microorganismos benéficos utilizados como agentes de control biológico, por lo que resulta necesario evaluar su compatibilidad antes de integrarlos en programas de manejo. El objetivo de este estudio fue evaluar la dinámica in vitro de *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. en interacción con diferentes diluciones de tebuconazol y determinar su efecto sobre el crecimiento de *Fusarium* spp. Se utilizó un diseño completamente al azar con 20 tratamientos, cuatro repeticiones y 80 unidades experimentales. Los hongos se cultivaron en agar papa dextrosa y se evaluaron durante cinco días consecutivos. El diámetro visible de las colonias se analizó mediante ANOVA, pruebas de comparación múltiple y modelos lineales mixtos con estructura autorregresiva. Al quinto día se detectaron diferencias entre tratamientos para el crecimiento de *Fusarium* spp. ($p < 0.0001$). T3 presentó el menor diámetro (11.25 mm) y una reducción de 80.35 % respecto al control, mientras que *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. sin fungicida redujeron el crecimiento de *Fusarium* spp. en 75.55 y 76.42

%, respectivamente. El tebuconazol 1:1000 aplicado solo no difirió del control. En ausencia de *Fusarium* spp., la dilución 1:1000 no redujo significativamente el crecimiento de los antagonistas respecto al tratamiento sin fungicida. La respuesta temporal dependió del tratamiento, la dilución y el día de evaluación. Los resultados evidencian que ambos antagonistas poseen capacidad para limitar el crecimiento de *Fusarium* spp. y que la compatibilidad con tebuconazol depende de la concentración y del tiempo de exposición.

Palabras clave: Control biológico, Crecimiento micelial, Fungicida, Interacción microbiana, Manejo integrado.

Abstract

The use of chemical fungicides to manage phytopathogenic fungi may also affect beneficial microorganisms used as biological control agents, making it necessary to evaluate their compatibility before integrating them into disease management programs. This study aimed to evaluate the in vitro growth dynamics of *Trichoderma* spp. and *Metarhizium* spp. in interaction with different dilutions of tebuconazole and determine their effects on the

growth of *Fusarium* spp. A completely randomized design was used, comprising 20 treatments, four replicates, and 80 experimental units. The fungi were cultured on potato dextrose agar and evaluated over five consecutive days. Visible colony diameter was analyzed using analysis of variance, multiple comparison tests, and linear mixed-effects models with an autoregressive correlation structure. On the fifth day, significant differences in *Fusarium* spp. growth were detected among treatments ($p < 0.0001$). Treatment T3 showed the smallest diameter (11.25 mm), representing an 80.35% reduction compared with the control, while *Trichoderma* spp. and *Metarhizium* spp. without fungicide reduced *Fusarium* spp. growth by 75.55% and 76.42%, respectively. Tebuconazole at a 1:1000 dilution, applied alone, did not differ significantly from the control. In the absence of *Fusarium* spp., the 1:1000 dilution did not significantly reduce antagonist growth compared with the fungicide-free treatment. Temporal responses depended on the treatment, dilution, and evaluation day. These findings indicate that both antagonists can limit *Fusarium* spp. growth and that their compatibility with tebuconazole depends on fungicide concentration and exposure time.

Palavras-chave: Biological control, Mycelial growth, Fungicide, Microbial interaction, Integrated management.

Sumario

O manejo de fungos fitopatogênicos por meio de fungicidas químicos também pode afetar microrganismos benéficos utilizados como agentes de controle biológico, tornando necessária a avaliação de sua compatibilidade antes de integrá-los aos programas de manejo. O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica in vitro de *Trichoderma* spp. e *Metarhizium* spp. em interação com diferentes diluições de tebuconazol e determinar seus efeitos sobre o crescimento de *Fusarium* spp. Utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado, com 20 tratamentos, quatro repetições e 80 unidades experimentais. Os fungos foram cultivados em ágar batata-dextrose e avaliados durante cinco

dias consecutivos. O diâmetro visível das colônias foi analisado por meio de análise de variância, testes de comparações múltiplas e modelos lineares mistos com estrutura de correlação autorregressiva. No quinto dia, foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos quanto ao crescimento de *Fusarium* spp. ($p < 0,0001$). O tratamento T3 apresentou o menor diâmetro (11,25 mm), correspondendo a uma redução de 80,35% em relação ao controle, enquanto *Trichoderma* spp. e *Metarhizium* spp., sem fungicida, reduziram o crescimento de *Fusarium* spp. em 75,55% e 76,42%, respectivamente. O tebuconazol na diluição 1:1000, aplicado isoladamente, não diferiu significativamente do controle. Na ausência de *Fusarium* spp., a diluição 1:1000 não reduziu significativamente o crescimento dos antagonistas em comparação com o tratamento sem fungicida. A resposta temporal dependeu do tratamento, da diluição e do dia de avaliação. Os resultados indicam que ambos os antagonistas apresentam capacidade de limitar o crescimento de *Fusarium* spp. e que sua compatibilidade com o tebuconazol depende da concentração do fungicida e do tempo de exposição.

Palavras-chave: Controle biológico, Crescimento micelial, Fungicida, interação microbiana, Manejo integrado.

Introducción

En el ámbito de la agricultura, el control de hongos fitopatógenos constituye un desafío constante. Tradicionalmente se han utilizado fungicidas químicos para disminuir la incidencia y severidad de las enfermedades; sin embargo, su uso continuo puede favorecer problemas de resistencia, además de generar preocupaciones ambientales y de salud. En este contexto, surge la necesidad de explorar alternativas de manejo más seguras y sostenibles que permitan reducir la dependencia exclusiva del control químico. Los hongos antagonistas representan una alternativa, debido a su capacidad para limitar el desarrollo de diversos fitopatógenos. No obstante, su

combinación con fungicidas precisa considerar la compatibilidad entre ambos componentes, debido a que los productos químicos empleados contra los fitopatógenos también pueden afectar a los microorganismos benéficos. Pérez et al. (2019) evaluaron la sensibilidad *in vitro* de *Alternaria sp.*, *Fusarium sp.* y *Rhizoctonia solani* bajo el efecto de diferentes fungicidas y antagonistas con potencial de control biológico. Determinaron que los fungicidas utilizados inhibieron el desarrollo micelial de los fitopatógenos antes mencionados, mientras tanto, los productos basados en *Trichoderma* también mostraron actividad biológica, sin embargo el estudio no evaluó directamente la sensibilidad del antagonista a los fungicidas, por lo que resulta necesario estudiar la eficacia del fungicida y su compatibilidad con los hongos benéficos.

La respuesta de los hongos antagonistas a los fungicidas puede variar según el microorganismo, el ingrediente activo y la concentración utilizada. Cabrera et al. (2020) evaluaron cepas nativas de *Trichoderma spp.* asociadas al manejo de *Fusarium graminearum* y observaron diferencias en su sensibilidad al tebuconazol, evidenciando que la compatibilidad con este fungicida puede depender del material biológico y de la concentración empleada.

De manera similar, Espinosa et al. (2020) evaluaron la compatibilidad de *Metarhizium anisopliae* con distintos fungicidas registrados para frijol, entre ellos tebuconazol, y encontraron efectos negativos sobre el crecimiento vegetativo del hongo. En conjunto, estos resultados resaltan la importancia de evaluar de forma previa la compatibilidad entre controladores biológicos y fungicidas antes de utilizarlos de forma combinada. Por otra parte, *Fusarium spp.* comprende hongos

fitopatógenos asociados a enfermedades de importancia agrícola y constituye uno de los componentes de los complejos de enfermedades del suelo considerados en la investigación original. El manejo de este tipo de problemas fitosanitarios se ha basado principalmente en fungicidas sintéticos, mientras que hongos como *Trichoderma spp.* se ha documentado su potencial en diferencias entre aislamientos nativos en sus propiedades antagonistas (Herrera et al., 2026; Sánchez, 2022).

Sin embargo, combinar agentes biológicos con productos químicos requiere evaluar de forma previa su compatibilidad, ya que los fungicidas pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los microorganismos benéficos o alterar el efecto esperado sobre el fitopatógeno (Cabrera et al, 2020). Por ello, resulta necesario evaluar experimentalmente no solo el efecto del fungicida sobre *Fusarium spp.*, sino también el comportamiento de los antagonistas en presencia de diferentes concentraciones del producto. Este enfoque permite determinar si una concentración capaz de limitar al fitopatógeno mantiene, al mismo tiempo, condiciones compatibles con el crecimiento de los microorganismos antagonistas.

Además, la evaluación repetida en el tiempo permite identificar diferencias en las trayectorias de crecimiento que podrían no ser evidentes al considerar únicamente una medición final. En este estudio se evaluaron *Trichoderma spp.* y *Metarhizium spp.* en combinación con diferentes diluciones de tebuconazol y su efecto sobre *Fusarium spp.* bajo condiciones controladas de laboratorio. El objetivo fue evaluar la dinámica *in vitro* de *Trichoderma spp.* y *Metarhizium spp.* en interacción con diferentes diluciones de tebuconazol y determinar su efecto sobre el

diámetro visible de *Fusarium* spp. y la compatibilidad de los antagonistas.

Materiales y Métodos

El ensayo *in vitro* se realizó en el laboratorio de la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda (UNFLEP), ubicado al norte del municipio de Estelí, Nicaragua, en las coordenadas 13.0863° N y 86.3557° O. Se utilizaron *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. como hongos antagonistas, *Fusarium* spp. como fitopatógeno y tebuconazol como fungicida.

Los microorganismos fueron proporcionados por una institución cuya identidad se mantiene bajo confidencialidad, conforme a las condiciones establecidas para el uso del material biológico. Los hongos se cultivaron en agar papa dextrosa (PDA), bajo condiciones asépticas. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), con 20 tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 80 unidades experimentales. Cada placa de Petri constituyó una unidad experimental independiente. Las diluciones de tebuconazol se prepararon

mediante una serie decimal sucesiva utilizando agua destilada. La dilución 1:10 se obtuvo mezclando 1 mL de la solución inicial de tebuconazol con 9 mL de agua destilada. Posteriormente, se tomó 1 mL de la dilución 1:10 y se mezcló con 9 mL de agua destilada para obtener 1:100; de igual forma, se tomó 1 mL de la dilución 1:100 y se adicionó a 9 mL de agua destilada para obtener 1:1000. Para el establecimiento de los tratamientos se utilizaron discos de inóculo de 0.5 cm de diámetro.

En las confrontaciones entre hongos se realizaron siguiendo el principio de cultivo dual utilizado por Cabrera et al. (2020) ; Cruz et al. (2025) y Ghimire y Adhikari (2023) la superficie de cada placa se distribuyó en dos sectores, los discos se colocaron sobre el medio PDA manteniendo una separación de 8 cm de borde a borde. Cada placa fue identificada según tratamiento, repetición y fecha de establecimiento. Las placas se incubaron a 25 ± 2 °C y en oscuridad constante, condiciones establecidas para la fase de laboratorio del estudio.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos utilizados en el ensayo *in vitro*.

Tratamiento	Composición
T1	Trichoderma spp.
T2	Metarhizium spp.
T3	Tebuconazol 1:10 + Trichoderma spp. + Fusarium spp.
T4	Tebuconazol 1:10 + Metarhizium spp. + Fusarium spp.
T5	Tebuconazol 1:100 + Trichoderma spp. + Fusarium spp.
T6	Tebuconazol 1:100 + Metarhizium spp. + Fusarium spp.
T7	Tebuconazol 1:1000 + Trichoderma spp. + Fusarium spp.
T8	Tebuconazol 1:1000 + Metarhizium spp. + Fusarium spp.
T9	Fusarium spp.
T10	Fusarium spp. + Trichoderma spp.
T11	Fusarium spp. + Metarhizium spp.
T12	Tebuconazol 1:10 + Trichoderma spp.
T13	Tebuconazol 1:10 + Metarhizium spp.
T14	Tebuconazol 1:100 + Trichoderma spp.
T15	Tebuconazol 1:100 + Metarhizium spp.
T16	Tebuconazol 1:1000 + Trichoderma spp.
T17	Tebuconazol 1:1000 + Metarhizium spp.
T18	Fusarium spp. + tebuconazol 1:10
T19	Fusarium spp. + tebuconazol 1:100
T20	Fusarium spp. + tebuconazol 1:1000

Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento de *Fusarium* spp., *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. se evaluó mediante el diámetro visible de la colonia, expresado en milímetros. Las mediciones se realizaron cada 24 horas durante cinco días consecutivos, utilizando las mismas unidades experimentales durante todo el período de evaluación. En los tratamientos de confrontación, el diámetro de cada microorganismo se midió de manera independiente, permitiendo registrar el crecimiento visible tanto del fitopatógeno como del antagonista bajo las diferentes condiciones evaluadas. Para cuantificar la reducción del crecimiento de *Fusarium* spp. al quinto día se utilizó T9 como tratamiento de referencia: Donde: DT9 correspondió al diámetro medio de *Fusarium* spp. sin fungicida ni antagonista y Di al diámetro medio de *Fusarium* spp. en cada tratamiento.

Los datos fueron inicialmente organizados y depurados en Microsoft Excel. Los análisis del quinto día se realizaron en InfoStat y los análisis de medidas repetidas en R. El diámetro de *Fusarium* spp. al quinto día se analizó mediante análisis de varianza, considerando el tratamiento como factor. La normalidad se evaluó sobre los residuos y la homogeneidad de varianzas mediante residuos absolutos. Cuando se cumplieron los supuestos, las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey con $\alpha = 0.05$. El antagonismo directo se evaluó mediante los tratamientos T9, T10 y T11.

La compatibilidad de los antagonistas con el fungicida, en ausencia de *Fusarium* spp., se analizó mediante un arreglo factorial 2×4 , considerando dos antagonistas y cuatro condiciones de fungicida: 1:10, 1:100, 1:1000 y sin fungicida. Se evaluaron los efectos de antagonista, dilución y su interacción. Para la persistencia de los antagonistas en presencia de *Fusarium* spp., la heterogeneidad de varianzas

condujo al empleo de pruebas no paramétricas para las comparaciones entre antagonistas dentro de cada condición, con corrección de Holm por comparaciones múltiples. La dinámica temporal se analizó mediante modelos lineales mixtos en R utilizando el paquete nlme. Para *Fusarium* spp. se consideraron como efectos fijos el tratamiento, el día y la interacción tratamiento $\times$ día, con la unidad experimental como efecto aleatorio y una estructura autorregresiva de primer orden [AR (1)] para las mediciones sucesivas.

Para los antagonistas se incluyeron como efectos fijos el antagonista, la dilución, el día y sus interacciones; la placa se consideró efecto aleatorio. Se incorporó una estructura AR (1) y una estructura de varianzas heterogéneas varIdent según la combinación antagonista $\times$ dilución. Las medias marginales estimadas se obtuvieron mediante el paquete emmeans. Las comparaciones de tratamientos respecto al control se realizaron mediante contrastes de Dunnett y las comparaciones múltiples entre antagonistas se ajustaron mediante el procedimiento de Holm. Se utilizó un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Resultados y Discusión

Se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos en el diámetro visible de *Fusarium* spp. al quinto día de evaluación ($F_{11,36} = 15.15$; $p < 0.0001$). El menor diámetro se registró en T3, con 11.25 mm, equivalente a una reducción de 80.35 % respecto al control T9. No obstante, T3 compartió grupo estadístico con T11, T10, T4, T7, T18 y T8, por lo que no presentó superioridad estadística frente a todos estos tratamientos (Tabla 2). Los tratamientos T10 y T11, correspondientes a la confrontación de *Fusarium* spp. con *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp., respectivamente, redujeron el diámetro del patógeno en 75.55 y 76.42 %

respecto a T9. Ambos antagonistas presentaron un comportamiento estadísticamente similar al quinto día. En contraste, T20 alcanzó 50.75 mm y compartió grupo estadístico con T9, cuyo diámetro fue de 57.25 mm, por lo que la dilución 1:1000 del fungicida aplicada sin antagonista no produjo una reducción significativa del crecimiento de *Fusarium* spp.

La reducción observada en los tratamientos con *Trichoderma* spp. se encuentra dentro del intervalo para diferentes especies de *Trichoderma*, reportado recientemente por Adnani et al. (2024) registraron inhibiciones de 71.33 a 80.66 % frente a cuatro aislamientos de *Fusarium*, mientras que Al-Shahrani et al., (2026) reportaron valores de 65.33 a 77.60 % frente a *F. oxysporum* y *F. brachygibbosum*.

Tabla 2. Efecto de los tratamientos sobre el diámetro visible de *Fusarium* spp. al quinto día de evaluación.

Tratamiento	Diámetro de <i>Fusarium</i> (mm)	Reducción respecto a T9 (%)	Grupo de Tukey
T3	11.25	80.35	a
T11	13.50	76.42	ab
T10	14.00	75.55	ab
T4	14.75	74.24	abc
T7	20.00	65.07	abcd
T18	21.00	63.32	abcd
T8	25.00	56.33	abcd
T19	32.25	43.67	bcde
T6	33.25	41.92	cde
T5	36.25	36.68	de
T20	50.75	11.35	ef
T9	57.25	0.00	f

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados contrastan con Ghimire y Adhikari (2023) quienes obtuvieron inhibiciones de 24.75 a 57.91 % entre diferentes aislamientos y formulaciones de *Trichoderma* frente a *Fusarium* asociado a pudrición de rizoma de jengibre. La comparación confirma que la capacidad antagónica puede variar considerablemente según el aislamiento, la especie del antagonista, el fitopatógeno y las condiciones del ensayo. De forma coincidente,

un estudio realizado en Nicaragua por Herrera Rodríguez et al. (2026) encontró diferencias entre cepas nativas de *Trichoderma* spp. en su capacidad para controlar *Fusarium* spp., evidenciando que el desempeño no debe generalizarse únicamente a nivel de género. En el caso de *Metarhizium*, la reducción de 76.42 % resultante en T11, es relevante debido a que este género se ha estudiado principalmente por su actividad entomopatógena. Sin embargo, existe evidencia reciente de actividad frente a fitopatógenos.

Muhorakeye et al. (2024) encontraron que distintos aislamientos de *M. anisopliae* inhibieron el crecimiento de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, aunque con valores de 35.23 a 40.63 %, inferiores a los obtenidos en este estudio. Asimismo, Cruz et al. (2025) en un estudio reportaron una inhibición de 62.9 % del crecimiento radial de *F. oxysporum* por encapsulados de *M. anisopliae* denominado CEM2. A pesar que las condiciones del estudio y la formulación empleadas fueron diferentes, estos resultados respaldan el potencial antagonista observado en este ensayo.

Por ello, aunque otros trabajos han demostrado competencia, antibiosis o micoparasitismo en determinadas interacciones de *Trichoderma* con *Fusarium*, esos mecanismos no pueden atribuirse directamente a los tratamientos evaluados aquí. El resultado del presente estudio demuestra antagonismo a partir de la reducción del diámetro visible del fitopatógeno, pero no permite demostrar el mecanismo de acción. El efecto del fungicida sobre *Fusarium* spp. también dependió de la dilución. En T20, correspondiente a tebuconazol 1:1000 aplicado sin antagonista, el diámetro final fue de 50.75 mm y no se detectaron diferencias significativas frente al control T9. Además, T20 no difirió de T9 en ninguna de las cinco evaluaciones

temporales, lo que indica que esta dilución tuvo un efecto limitado sobre el crecimiento del fitopatógeno bajo las condiciones experimentales empleadas. La sensibilidad de *Fusarium* a tebuconazol ha sido demostrada de forma variables, dependiendo de la concentración del fungicida, especie y condiciones ambientales.

Pérez et al. (2019) encontraron que tebuconazol redujo marcadamente el crecimiento in vitro de *Fusarium* y otros fitopatógenos. Cendoya et al. (2021) al evaluar dos aislamientos de *F. proliferatum*, observaron que la reducción del crecimiento aumentó conforme se incrementó la concentración de los fungicidas evaluados. Estos datos explican la importancia de la concentración del fungicida en la respuesta del fitopatógeno, sin embargo, estas conclusiones deben analizarse bajo el contexto específico de cada ensayo.

Zhao y Huang (2023) también demostraron una elevada sensibilidad de *F. oxysporum* y *F. concentricum* frente a una formulación que contenía trifloxystrobin + tebuconazol, con valores de EC₅₀ de 0.13 y 0.14 µg/mL. Sin embargo, este resultado no puede compararse directamente con T20, debido a que dicho estudio utilizó una mezcla de dos ingredientes activos y concentraciones expresadas en µg/mL, mientras que el presente ensayo se emplearon diluciones decimales sucesivas de tebuconazol.

T3 presentó el menor diámetro de *Fusarium* spp. al quinto día, con 11.25 mm y una reducción de 80.35 % respecto a T9. Sin embargo, compartió grupo estadístico con otros tratamientos, por lo que no puede considerarse estadísticamente superior a todas las combinaciones evaluadas. Un resultado especialmente relevante fue la comparación

entre T20 y los tratamientos T7 y T8. Los tres incluyeron la dilución 1:1000, pero T20 correspondió al fungicida aplicado solo, mientras que T7 y T8 incorporaron *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp., respectivamente. Aunque T20 no difirió del control, T7 y T8 alcanzaron diámetros de *Fusarium* considerablemente menores. Esto demuestra que la presencia de los antagonistas contribuyó de manera importante al comportamiento observado en las combinaciones.

No obstante, esta diferencia no demuestra sinergia. Para demostrar una interacción sinérgica sería necesario comparar formalmente el efecto observado de las combinaciones con el efecto esperado de los componentes individuales mediante un modelo específico de interacción. Los datos disponibles permiten afirmar únicamente que las combinaciones presentaron un comportamiento diferente al fungicida 1:1000 aplicado de manera aislada. Desde una perspectiva de manejo integrado, estos hallazgos muestran la necesidad de evaluar con anticipación la compatibilidad o interacción entre los agentes antagonistas y los fungicidas químicos. Cabrera et al. (2020) encontraron variaciones en la sensibilidad de cepas de *Trichoderma* spp. al tebuconazol, mientras que Kumari et al. (2025) señalaron que este mismo fungicida tiene un efecto fuertemente inhibitorio sobre el crecimiento de *T. asperellum*.

De igual forma, Loureiro et al. (2025) observaron variabilidad de *M. rileyi* ante diferentes fungicidas, algunos compatibles y otros con efectos negativos sobre su desarrollo. En este sentido, la compatibilidad depende del microorganismo, del producto utilizado y de su concentración. Aunque en el presente estudio, algunas combinaciones redujeron

considerablemente el diámetro visible de *Fusarium spp.*, esto no significa necesariamente que exista sinergia o que dichas combinaciones sean viables para su aplicación en campo. Por tanto, es importante continuar evaluando su comportamiento bajo otras condiciones. El análisis longitudinal mediante un modelo mixto con estructura autorregresiva AR (1) mostró efectos significativos del tratamiento ($F_{11,36} = 4.08$; $p = 0.0006$), del día de evaluación ($F_{4,144} = 4.16$; $p = 0.0032$) y de la interacción tratamiento $\times$ día ($F_{44,144} = 3.17$; $p < 0.0001$).

La interacción indicó que la evolución del diámetro de *Fusarium spp.* durante los cinco días dependió del tratamiento aplicado. El control T9 mostró un incremento progresivo desde aproximadamente 45.0 mm en el primer día hasta 57.2 mm en el quinto. Por el contrario, en T10 y T11 el diámetro disminuyó progresivamente hasta 14.0 y 13.5 mm, respectivamente. Los tratamientos T3, T4, T5, T7, T8 y T18 mantuvieron diferencias significativas respecto a T9 durante los cinco días de evaluación. En cambio, T20 no difirió significativamente de T9 en ninguna de las fechas evaluadas (Figura 1).

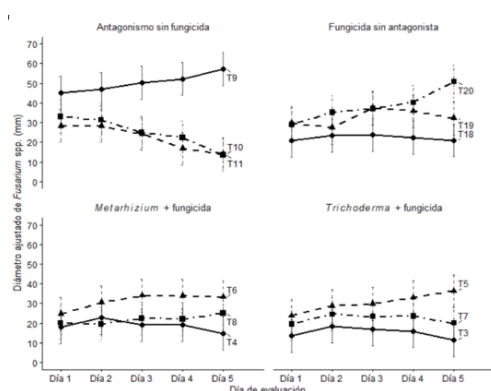


Figura 1. Dinámica temporal del diámetro de *Fusarium spp.* bajo los tratamientos evaluados.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis temporal permitió identificar diferencias que no habrían sido evidentes utilizando únicamente el valor final. La interacción tratamiento $\times$ día fue significativa para *Fusarium spp.* Esto demuestra que las respuestas cambiaron durante los cinco días y que el efecto de una dilución determinada no fue constante entre antagonistas ni fechas.

Este comportamiento coincide con investigaciones recientes donde la capacidad inhibitoria de *Trichoderma* se desarrolla progresivamente durante la confrontación. Al-Shahrani et al., (2026) por ejemplo, observaron actividad inhibitoria desde el tercer día y diferencias posteriores entre especies de *Trichoderma* frente a *Fusarium*. Ghimire y Adhikari (2023) también realizaron mediciones sucesivas cada 24 h y observaron trayectorias diferentes entre aislamientos. Por tanto, el análisis longitudinal constituye una fortaleza del presente estudio, ya que permite interpretar la compatibilidad y el antagonismo como procesos dinámicos y no únicamente como una diferencia entre tratamientos al quinto día.

Al quinto día, el diámetro visible de los antagonistas estuvo influenciado significativamente por el antagonista evaluado ($F_{1,24} = 9.90$; $p = 0.0044$) y por la dilución del fungicida ($F_{3,24} = 11.53$; $p = 0.0001$). La interacción antagonista $\times$ dilución no fue significativa ($F_{3,24} = 0.30$; $p = 0.8283$). *Metarhizium spp.* presentó un diámetro promedio de 43.44 mm, mientras que *Trichoderma spp.* alcanzó 52.44 mm. Respecto a la dilución, el menor crecimiento se registró con 1:10 (35.75 mm), seguido de 1:100 (45.25 mm), 1:1000 (52.50 mm) y el tratamiento sin fungicida (58.25 mm). La dilución 1:1000 no difirió significativamente del tratamiento sin fungicida al quinto día (Tabla 3). El análisis temporal permitió identificar diferencias que no

habrían sido evidentes utilizando únicamente el valor final. La interacción tratamiento $\times$ día fue significativa para *Fusarium* spp. Esto demuestra que las respuestas cambiaron durante los cinco días y que el efecto de una dilución determinada no fue constante entre antagonistas ni fechas. Este comportamiento coincide con investigaciones recientes donde la capacidad inhibitoria de *Trichoderma* se desarrolla progresivamente durante la confrontación. Al-Shahrani et al. (2026) por ejemplo, observaron actividad inhibitoria desde el tercer día y diferencias posteriores entre especies de *Trichoderma* frente a *Fusarium*.

Tabla 3. Efecto del antagonista y la dilución de tebuconazol sobre el diámetro visible de los antagonistas al quinto día de evaluación.

Factor	Nivel	Diámetro medio (mm)	Grupo de Tukey
Antagonista	<i>Metarhizium</i> spp.	43.44	a
	<i>Trichoderma</i> spp.	52.44	b
Dilución	1:10	35.75	a
	1:100	45.25	ab
	1:1000	52.50	bc
	SF	58.25	c

Fuente: Elaboración propia.

Ghimire y Adhikari, (2023) también realizaron mediciones sucesivas cada 24 h y observaron trayectorias diferentes entre aislamientos. Por tanto, el análisis longitudinal constituye una fortaleza del presente estudio, ya que permite interpretar la compatibilidad y el antagonismo como procesos dinámicos y no únicamente como una diferencia entre tratamientos al quinto día. Compatibilidad de los antagonistas con el fungicida. Al quinto día, el diámetro visible de los antagonistas estuvo influenciado significativamente por el antagonista evaluado ($F_{1,24} = 9.90$; $p = 0.0044$) y por la dilución del fungicida ($F_{3,24} = 11.53$; $p = 0.0001$). La interacción antagonista $\times$ dilución no fue significativa ($F_{3,24} = 0.30$; $p = 0.8283$). *Metarhizium* spp. presentó un diámetro

promedio de 43.44 mm, mientras que *Trichoderma* spp. alcanzó 52.44 mm. Respecto a la dilución, el menor crecimiento se registró con 1:10 (35.75 mm), seguido de 1:100 (45.25 mm), 1:1000 (52.50 mm) y el tratamiento sin fungicida (58.25 mm). La dilución 1:1000 no difirió significativamente del tratamiento sin fungicida al quinto día (Tabla 3).

La respuesta observada coincide conceptualmente con estudios que muestran que la compatibilidad de *Trichoderma* con fungicidas es dependiente tanto del ingrediente activo como de la concentración. (Sunkad et al., 2023), encontraron que tebuconazol 25.9 % EC produjo 100 % de inhibición de *T. asperellum* en las tres concentraciones evaluadas, mientras que otros fungicidas fueron parcial o completamente compatibles. De manera similar, Kumari et al., (2025) encontraron que tebuconazol 25.9 % EC a 25, 50 y 100 ppm resultó incompatible con *T. asperellum* y señalaron una tendencia general de disminución del crecimiento micelial conforme aumentó la concentración del fungicida.

Estos resultados no contradicen la respuesta obtenida con 1:1000 en el presente estudio, porque las concentraciones, formulaciones y materiales biológicos no son directamente equivalentes, al contrario, demuestran que la compatibilidad con tebuconazol puede modificarse sustancialmente según la concentración efectiva y el material fúngico evaluado. Por ello, la condición 1:1000 debe describirse como de mayor compatibilidad aparente, sin interpretar este comportamiento como resistencia al fungicida. La respuesta de *Metarhizium* también es consistente con la importancia de evaluar selectividad antes de combinar agentes biológicos con productos químicos. Loureiro et al. (2025) observaron respuestas contrastantes de *M. rileyi* frente a

diferentes fungicidas: algunos productos fueron compatibles, otros moderadamente tóxicos y otros tóxicos, afectando crecimiento vegetativo, esporulación y germinación. El análisis de medidas repetidas mostró un efecto significativo de la dilución ($F_{3,24} = 3.73$; $p = 0.0247$) y del día de evaluación ($F_{4,96} = 15.98$; $p < 0.0001$). También se detectaron interacciones significativas dilución $\times$ día ($F_{12,96} = 3.03$; $p = 0.0012$) y antagonista $\times$ dilución $\times$ día ($F_{12,96} = 2.83$; $p = 0.0023$), evidenciando que la respuesta temporal al fungicida dependió conjuntamente del antagonista y de la dilución utilizada. En las comparaciones de cada dilución frente al tratamiento sin fungicida, *Metarhizium* spp. presentó una reducción significativa del diámetro con 1:10 durante los días 4 y 5. En

Trichoderma spp., la dilución 1:100 produjo diferencias significativas desde el día 3 hasta el día 5, mientras que 1:10 difirió únicamente al quinto día. La dilución 1:1000 no produjo diferencias significativas frente al tratamiento sin fungicida en ninguno de los cinco días para ninguno de los dos antagonistas. Las comparaciones directas entre antagonistas mostraron diferencias significativas, después del ajuste de Holm, únicamente con la dilución 1:1000 en los días 2 y 3, cuando *Trichoderma* spp. presentó diámetros superiores a *Metarhizium* spp. En las restantes combinaciones de dilución y tiempo no se detectaron diferencias significativas entre antagonistas (Figura 2).

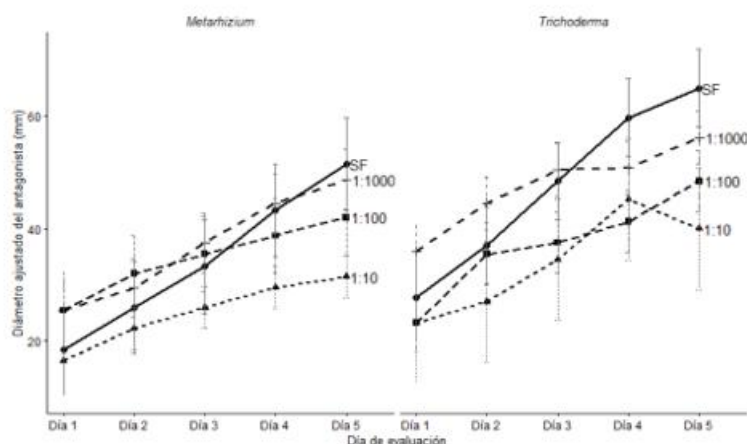


Figura 2. Dinámica temporal del diámetro de *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. bajo diferentes diluciones de fungicida.

La interacción de los factores antagonistas, dilución y día, muestra que la respuesta de los microorganismos al fungicida fue variable durante el periodo experimental. Por este motivo, la evaluación temporal, complementa los resultados del quinto día y permite entender la compatibilidad como una respuesta que depende tanto de la dilución como del tiempo de exposición. En presencia de *Fusarium* spp.,

el diámetro visible de los antagonistas al quinto día aumentó conforme disminuyó la concentración del fungicida. En la dilución 1:10, *Metarhizium* spp. no presentó crecimiento visible, mientras que *Trichoderma* spp. alcanzó 3.50 mm. En 1:100, los diámetros fueron de 5.50 y 19.75 mm, respectivamente; en 1:1000, de 17.25 y 21.75 mm; y en ausencia de fungicida, de 67.50 y 58.25 mm. La mayor

separación numérica entre antagonistas ocurrió con la dilución 1:100. Sin embargo, después del ajuste de Holm por comparaciones múltiples, no se detectaron diferencias significativas entre *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. dentro de ninguna de las condiciones evaluadas.

Conclusiones

Trichoderma spp. y *Metarhizium* spp. mostraron una alta capacidad antagónica frente a *Fusarium* spp. en condiciones *in vitro*. Al quinto día, ambos antagonistas redujeron el crecimiento del fitopatógeno en más de 75 %, sin diferencias significativas entre ellos, lo que evidencia un comportamiento comparable bajo las condiciones evaluadas. La respuesta de los antagonistas al tebuconazol dependió de la dilución y del tiempo de exposición. Las concentraciones mayores afectaron más el crecimiento micelial, mientras que la dilución 1:1000 no presentó diferencias significativas respecto al tratamiento sin fungicida, por lo que mostró la mayor compatibilidad aparente entre las condiciones evaluadas. Este comportamiento no debe interpretarse como resistencia al fungicida.

El tratamiento T3 presentó la mayor reducción numérica de *Fusarium* spp. (80.35 %); sin embargo, no fue estadísticamente superior a todas las combinaciones evaluadas. Asimismo, el tebuconazol 1:1000 aplicado de manera aislada no difirió del control, mientras que su combinación con los antagonistas produjo una mayor reducción del crecimiento del fitopatógeno. Estos resultados muestran la contribución de los agentes biológicos dentro de las combinaciones, aunque no permiten demostrar sinergia. La dinámica temporal confirmó que la respuesta de *Fusarium* spp. y de los antagonistas cambió durante los cinco días de evaluación, por lo que el efecto de los tratamientos no puede interpretarse únicamente

a partir de una medición final. En conjunto, los resultados respaldan el potencial de integrar *Trichoderma* spp. y *Metarhizium* spp. con concentraciones compatibles de tebuconazol; sin embargo, se requieren evaluaciones adicionales de germinación, esporulación, viabilidad, concentración efectiva del ingrediente activo y validaciones en invernadero y campo antes de recomendar estas combinaciones para manejo fitosanitario.

Agradecimientos

A Dios, por la sabiduría para entender y generar ciencia. A mis padres, por su constante e incondicional apoyo a lo largo de toda mi vida. Finalmente, a mis amigos Freddy y Norman, por su colaboración y respaldo en la ejecución de este experimento.

Referencias Bibliográficas

- Adnani, M., Hazzat, N., Alaoui, M., Selmaoui, K., Benkirane, R., Touhami, A., & Douira, A. (2024). In vitro and in vivo study of the antagonistic effects of a *Trichoderma* strain against four isolates of *Fusarium* that are pathogenic to chickpea. *3 Biotech*, 14(11), 271. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04112-5>
- Al-Shahrani, S., Al-Askar, A., Hyde, K., & Al-Otibi, F. (2026). Indigenous *Trichoderma* species multi-mechanistic antagonism against *Fusarium* root disease in *Coffea arabica*: Volatile-mediated inhibition, morphological, and molecular profiling. *Frontiers in Microbiology*, 17, 1899216. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1899216>
- Cabrera, M., Garmendia, G., Rufo, C., Pereyra, S., & Vero, S. (2020). *Trichoderma atroviride* como controlador biológico de fusariosis de espiga de trigo mediante la reducción del inóculo primario en rastrojo. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 629–651. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.664>
- Cendoya, E., Nichea, M., Monge, M., Zchetti, V., Chiacchiera, S., & Ramirez, M. (2021). Effect of fungicides commonly used for *Fusarium* head blight management on growth

- and fumonisin production by *Fusarium proliferatum*. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(1), 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.12.005>
- Cruz, R., Pereyra, M., Ruiz, N., Ruiz-, V., Porraz, M., & Gómez, J. (2025). Caracterización de encapsulados de *Metarhizium anisopliae* y su efecto sobre el crecimiento de plantas de *Capsicum chinense* Jacq. inoculadas con *Fusarium*. *Terra Latinoamericana*, 43, 2004. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2004>
- Espinosa, D., Cunha, N., Rivera, S., Ricardez, A., Carvalho, V., Silva, A., & Duarte, R. (2020). Compatibilidade entre *Metarhizium anisopliae* e fungicidas registrados para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira Multidisciplinar*, 23(2), 180–187. <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2020.v23i2.743>
- Ghimire, M., & Adhikari, N. (2023). In-vitro analysis of different *Trichoderma* spp. against *Fusarium* rhizome rot of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *AgroEnvironmental Sustainability*, 1(2), 142–151. <https://doi.org/10.59983/s2023010207>
- Herrera, N., Rodríguez, M., Bandon, J., & Morán, J. (2026). Efecto de cepas nativas de *Trichoderma* spp. sobre *Sclerotium* sp. y *Fusarium* sp. evaluadas in vitro. *Siembra*, 13(1), e7975. <https://doi.org/10.29166/siembra.v13i1.7975>
- Kumari, N., Yadav, D., Bochalya, R., Sharma, S., Meena, C., & Gautam, C. (2025). Compatibility of *Trichoderma asperellum* with different fungicides. *Journal of Advances in Microbiology*, 25(8), 1–7. <https://doi.org/10.9734/jamb/2025/v25i8970>
- Loureiro, E., Barbosa, G., Dias, P., Pessoa, L., Rodrigues, A., Godoy, M., Mesa, N., & Gregori, G. (2025). In vitro compatibility of fungicides with *Metarhizium rileyi* in soybean disease management. *Revista Caatinga*, 38, e12752. <https://doi.org/10.1590/1983-21252025v38i12752rc>
- Muhorakeye, M., Namikoye, E., Khamis, F., Wanjohi, W., & Akutse, K. (2024). Biostimulant and antagonistic potential of endophytic fungi against *Fusarium* wilt pathogen of tomato *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Scientific Reports*, 14(1), 15365. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66101-1>
- Pérez, L., Pérez, L., Guzmán, R., Sanzón-, D., & Belmonte, J. (2019). Sensibilidad in vitro de hongos fitopatógenos causantes de enfermedades en fresa a controladores biológicos y fungicidas, en el estado de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 29. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2339>
- Sánchez, M. (2022). Evaluación del potencial de aislados de *Trichoderma* spp. como inhibidor a nivel in vitro del crecimiento de tres aislados del género *Fusarium* spp. *Nexo Revista Científica*, 35(2), 425–432. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14618>
- Sunkad, G., Joshi, R., & Patil, M. (2023). Compatibility of indigenous *Trichoderma asperellum* with chemical fungicides for the management of chickpea wilt. *Journal of Biological Control*, 6–12. <https://doi.org/10.18311/jbc/2023/32435>
- Zhao, J., & Huang, M. (2023). Characterization and in vitro fungicide sensitivity of two *Fusarium* spp. associated with stem rot of dragon fruit in Guizhou, China. *Journal of Fungi*, 9(12), 1178. <https://doi.org/10.3390/jof9121178>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © José Leonidas Guevara Acevedo, Jorling María Castillo Rodríguez y Norman Isaac Pacheco Pichardo.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT).

José Leonidas Guevara Acevedo: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Jorling María Castillo Rodríguez: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.

Norman Isaac Pacheco Pichardo: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

