



Artículo Científico

Control de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con *Trichoderma* spp.: evaluación cuantitativa mediante el paquete Pliman

Sandra Lizveth Enríquez-López¹, Gerardo Alvarado-Castillo^{1*}, Carlos Roberto Cerdán-Cabrera¹, Rosalba Argumedo-Delira², Esteban Escamilla-Prado³. ¹Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Agrícolas, Doctorado en Ciencias Agropecuarias. Lomas del Estadio s/n, CP 91000, Xalapa, Veracruz, México. ²Universidad Veracruzana, Instituto de Química Aplicada. Luis Castelazo Ayala s/n, Col. Industrial Animas, CP 91190, Xalapa, Veracruz, México. ³Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Oriente. Carretera Federal Huatusco-Xalapa Km. 6.5, CP 94100, Huatusco de Chicuellar, Veracruz, México.

*Autor de Correspondencia:

Gerardo Alvarado-Castillo
gealvarado@uv.mx

Sección:

Número Especial

Recibido:

28 Noviembre, 2024

Aceptado:

13 Octubre, 2025

Publicado:

14 Octubre, 2025

Cita:

Enríquez-López SL, Alvarado-Castillo G, Cerdán-Cabrera CR, Argumedo-Delira R y Escamilla-Prado E. 2025. Control de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con *Trichoderma* spp.: evaluación cuantitativa mediante el paquete Pliman. Revista Mexicana de Fitopatología 43(4): 95.
<https://doi.org/10.18781/R.ME.X.FIT.2024-36>

RESUMEN

Antecedentes/Objetivo. La roya (*Hemileia vastatrix*) reduce la producción y rentabilidad de la cafecultura. Las alternativas para su control (químico y genético) no han sido del todo eficientes, por lo que se propone el uso de microorganismos como *Trichoderma*. Actualmente, herramientas como el paquete Pliman ofrecen una alternativa cuantitativa de evaluación de severidad. El objetivo fue evaluar la efectividad de cepas de *Trichoderma* aplicadas al suelo en la reducción de la severidad de *H. vastatrix* mediante análisis digital de imágenes con el paquete Pliman.

Materiales y Métodos. Se evaluó el efecto de *Trichoderma harzianum* (Th), *T. asperellum* (Ta) y su consorcio (Th_Ta) en dos concentraciones (1×10^8 y 1×10^{12} conidios mL^{-1}) a 42 plantas de café 'Catuaí Amarillo' asintomáticas y sintomáticas. Se realizaron aplicaciones al suelo cada dos meses durante un año. La severidad se cuantificó con el paquete Pliman en R-Studio. Con los datos se realizó un ANOVA factorial y pruebas de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados. Los tratamientos con *Trichoderma* redujeron significativamente ($p < 0.05$) la severidad en comparación con el testigo. Las plantas asintomáticas tratadas mostraron la menor severidad (Th_Ta=5.99 %, Th=5.61 %, Ta=8.61 %). En plantas sintomáticas, *T. asperellum* (Ta) fue el más efectivo, reduciendo la severidad a un 8.25 %, valor que no mostró diferencia significativa con el de las plantas asintomáticas tratadas. No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones utilizadas (1×10^8 y 1×10^{12} conidios mL^{-1}). La severidad presentó una clara variación estacional, siendo menor en meses secos (febrero=4.89 %, agosto=4.71 % y abril=5.23 %) y mayor en los lluviosos (junio=15.29 %, octubre=10.79 % y diciembre=23.39 %).

Conclusión. La aplicación al suelo de *Trichoderma* spp. reduce significativamente la severidad de la roya del café. Los tratamientos más efectivos fueron el consorcio de *T. harzianum* y *T. asperellum* en plantas asintomáticas y *T. asperellum* en plantas sintomáticas, siendo la concentración de 1×10^8 conidios mL^{-1} la más recomendable por su eficacia y viabilidad económica. Finalmente, el paquete Pliman demostró ser una herramienta eficaz para la cuantificación objetiva de la enfermedad.

Palabras clave: Control biológico, Manejo integrado, Cafecultura, Evaluación cuantitativa



INTRODUCCIÓN

El cultivo del café en México es una actividad estratégica por su importancia económica, sociocultural y ambiental (Escamilla, 2021). La superficie destinada, el volumen de comercialización y el número de productores dedicados a su cultivo, han dado lugar a regiones reconocidas a nivel nacional e internacional como Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla y Guerrero (SIAP, 2022), lo que les ha concedido reputación, tradición e identidad (Nava-Tablada, 2012). No obstante, el sector enfrenta desafíos significativos, siendo la roya del café (*Hemileia vastatrix*) su principal amenaza fitosanitaria. La crisis de 2012-2013 provocó pérdidas cuantiosas, afectando más de 100 mil hectáreas y reduciendo la producción nacional en un 50 % (Boudrot *et al.*, 2016). Por tal motivo, la roya es una enfermedad de relevancia internacional, nacional y regional (Chambe, 2020), por lo que en México está sujeta a control oficial (Haddad *et al.*, 2009).

La infección se manifiesta por manchas amarillas en el envés de las hojas, provocando su caída prematura, desecación de las ramas e incluso la muerte de las plantas (Quispe-Apaza *et al.*, 2021). Esto afecta negativamente la calidad de los granos y reduce los rendimientos, hasta un 40 % (Alvarado-Castillo *et al.*, 2017; Escamilla, 2021). En el control de la enfermedad se ha utilizado principalmente fungicidas sistémicos y de contacto, formulados a base de cobre (Avelino *et al.*, 2015; Haddad *et al.*, 2009; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020), que, aunque efectivos, presentan riesgos para la salud humana y el ambiente, debido a su manipulación directa, efectos residuales y contaminación del suelo, aire y agua; además, implican altos costos y riesgo de desarrollo de resistencia (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020).

Ante esta situación, una estrategia promisoriosa es la utilización de microorganismos antagonistas tales como *Lecanicillium lecanii* y *Trichoderma* spp. (Michel-Aceves *et al.*, 2019) reconocidos por su capacidad para actuar como agentes beneficiosos en la agricultura (Alfonso *et al.*, 2005). Este último es particularmente eficaz debido a su rápida colonización de la rizosfera, promoción del crecimiento vegetal y múltiples mecanismos de acción, como el parasitismo, la competencia, la inducción de resistencia sistémica (RSI) y absorción de nutrientes, especialmente fósforo (Harman *et al.*, 2004; Aswani *et al.*, 2022; Yao *et al.*, 2023). Cabe destacar que, aunque el patógeno es foliar, aplicar *Trichoderma* al suelo puede desencadenar respuestas sistémicas que modulan la severidad en la parte aérea, lo que posiciona a este organismo como un candidato prometedor para el biocontrol de la roya (Aswani *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2022).

En este sentido, la detección temprana y precisa de la enfermedad es crucial para la aplicación adecuada de los agentes fitosanitarios, predecir pérdidas y pronosticar epidemias. En el caso de la roya, se han desarrollado escalas diagramáticas basadas en estimaciones visuales para evaluar la gravedad de la enfermedad, siendo importantes en la toma de decisiones (Barbedo, 2014). Por ejemplo, CENICAFÉ en Colombia desarrolló diagramas con 15 niveles de severidad que van del 0.05 al 80.0 % (López-Vásquez *et al.*, 2018), Brasil con seis (2.5, 5, 10, 20, 40 y 80 %) (Capucho *et al.*, 2011) y en México, SENASICA estableció siete categorías del daño que van del 0 al 70 % (Calderón, 2016). Sin embargo, estas estimaciones pueden ser subjetivas y depender de la experiencia del evaluador, lo que genera imprecisiones (Avelino *et al.*, 2015).

Por ello, la evaluación de enfermedades ha avanzado hacia el uso de análisis de imágenes digitales, agilizando el proceso y proporcionando estimaciones precisas (Bock *et al.*, 2020; Gallego-Sánchez *et al.*, 2020; Mutka y Bart, 2015). Algunos softwares utilizados

son ImageJ con el script rust (Schneider *et al.*, 2012), Quant (Bock *et al.*, 2020) y R-Studio con el paquete Pliman (Olivoto *et al.*, 2022). Estos programas analizan los valores de los colores rojo, verde y azul (RGB) de fotografías digitales para cuantificar el área foliar afectada por enfermedades de manera objetiva (Bock *et al.*, 2020). No obstante, su aplicación para cuantificar la roya del café no ha sido reportada en la literatura. Por ello, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la aplicación al suelo de *Trichoderma* spp. sobre la severidad de *H. vastatrix* en café, utilizando el paquete Pliman en R-Studio como herramienta para su cuantificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El experimento se llevó a cabo en la finca Los Barreales, ubicada en el municipio de Teocelo, Veracruz (19°23'37.3" N, 96°59'01.0" O; 19°23'39.7" N, 96°59'12.4" O), desde abril de 2022 hasta febrero de 2023.

Material biológico. Se emplearon las cepas *T. harzianum* (IE-996) y *T. asperellum* (TA-3) obtenidas del cepario del Instituto de Ecología A.C. (INECOL) y de la Universidad Veracruzana campus Tuxpan, respectivamente. Éstas se cultivaron en Papa-Dextrosa-Agar (PDA) (Bioxon®) bajo condiciones asépticas y oscuridad durante cinco días a una temperatura de 26 °C. Las plantas de café (*C. arabica*) utilizadas fueron de la variedad Catuaí Amarillo con una edad de ocho años con manejo convencional.

Producción de inóculo. La obtención masiva de *Trichoderma* spp. se realizó usando arroz como sustrato, siguiendo el método de Michel-Aceves *et al.* (2008) con modificaciones. Para ello, 3 kg del grano se lavaron con agua corriente y se hidrataron durante 20 minutos en 5 L de agua con 1.25 g de cloranfenicol (Lebrocetin®) para prevenir contaminación bacteriana. Tras escurrir el exceso de agua, se pesaron porciones de 350 g y se envasaron en bolsas de polipropileno para su esterilización bajo condiciones convencionales, durante 30 minutos. Una vez que el sustrato se enfrió a temperatura ambiente, se inoculó con una suspensión de conidios obtenida de cultivos en PDA, previamente ajustada a una concentración de 1×10^7 conidios mL^{-1} mediante el uso de una Cámara de Neubauer. Bajo condiciones estériles, se inyectaron 20 mL de esta suspensión en cada bolsa. Éstas se incubaron a 25 ± 2 °C durante 21 días, agitándose cada 72 h para favorecer una esporulación homogénea. Finalmente, el arroz colonizado se lavó con agua destilada estéril, adicionada con TWEEN 80 al 0.01 %, filtrando el líquido con un tamiz de malla No 20 (0.850 mm). A partir de esta suspensión, se ajustaron las concentraciones finales para los tratamientos de campo: 1×10^8 (C1) y 1×10^{12} (C2) conidios mL^{-1} . Las soluciones se almacenaron en contenedores de 500 mL hasta su aplicación (Martínez *et al.*, 2008; Yáñez-Hernández *et al.*, 2023).

Diseño experimental. Se empleó un diseño de bloques al azar con arreglo factorial $3 \times 2 \times 2$, cuyos factores fueron: 1) Cepas: *T. harzianum* (Th), *T. asperellum* (Ta) y un consorcio (Th_Ta) (mezclando volúmenes iguales de las suspensiones de Th y Ta en la concentración correspondiente), 2) Concentraciones: 1×10^8 (C1) y 1×10^{12} (C2) conidios mL^{-1} y 3) Estado sanitario inicial de la planta: Sintomática (con pústulas de *H. vastatrix*) y Asintomáticas (sin pústulas visibles), resultando 12 tratamientos. Adicionalmente, se incluyeron dos controles: un testigo (T), que recibió agua estéril, y un blanco (B), que correspondió al manejo convencional del productor, totalizando 14 tratamientos. Cada tratamiento, se tuvo

tres repeticiones (plantas de café), dando un total de 42 unidades experimentales. Para minimizar la interferencia, se dejó una calle de plantas sin inocular entre cada tratamiento. Cada planta recibió 1 L de la suspensión correspondiente, aplicado directamente al suelo en la zona de goteo, cada dos meses durante un año (seis aplicaciones en total). Dado que el ensayo se condujo en condiciones de campo sin barreras físicas, se permitió la dispersión natural del patógeno. Esta condición permitió evaluar la eficacia de los tratamientos bajo una presión de inóculo realista, aunque implicó que el estado sanitario de algunas plantas podría cambiar a lo largo del estudio. La variable respuesta fue el porcentaje de severidad de la roya, mediante el análisis de imágenes con el paquete Pliman (Enríquez-López *et al.*, 2025).

Análisis digital de la severidad de la roya con el paquete Pliman. La evaluación se realizó mediante análisis de imágenes digitales con dicho paquete en R-Studio. El protocolo de captura y análisis fue previamente establecido y validado por Enríquez-López *et al.* (2025) para esta misma variedad de café y patosistema. El protocolo consiste en la estandarización del proceso a través de cuatro etapas de validación con muestras de precisión creciente, que permite seleccionar el índice de diferencia normalizada verde-rojo (NGRDI) con un umbral de 0.045 como el parámetro más preciso para distinguir el tejido infectado por *H. vastatrix* del tejido sano. En el presente estudio, se aplicó este protocolo para cada tratamiento, en cada periodo de aplicación, recolectando tres hojas por planta (una del estrato alto, medio y bajo del dosel) de las 42 unidades experimentales. Las hojas se fotografiaron sobre un fondo blanco bajo iluminación natural difusa, con una cámara Sony A6400 y lente Sigma 30 mm, siguiendo los parámetros técnicos definidos (Enríquez-López *et al.*, 2025). Las imágenes fueron procesadas de forma automatizada en R-Studio utilizando el índice y umbral predefinidos (NGRDI = 0.045) para cuantificar el porcentaje de área foliar afectada (severidad) en cada tratamiento a lo largo del tiempo.

Análisis de la información. Los datos obtenidos se organizaron en una base, verificando los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia y posteriormente se aplicó un ANOVA de medidas repetidas para evaluar los distintos factores y sus interacciones, así como la evolución temporal de la severidad de la roya durante el año de estudio, seguidos de una prueba de comparación de medias, Tukey ($p < 0.05$). Todos los análisis se efectuaron en el programa R-Studio versión 4.3.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de *Trichoderma* en la severidad de la roya. Se encontraron diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$) entre los tratamientos. La aplicación de *Trichoderma* spp. redujo la severidad de *H. vastatrix* en comparación con los controles. Los tratamientos más efectivos fueron el consorcio (Th_Ta; 8.10 %^a) y *T. harzianum* (Th; 8.43 %^a), seguidos de *T. asperellum* (Ta; 9.2 %^a). Todos estos valores fueron significativamente inferiores al manejo convencional o blanco (13.58 %^b) y al testigo (20.66 %^c). Estos resultados señalan el potencial biocontrolador de *Trichoderma* contra un patógeno foliar, incluso cuando se aplica al suelo, tal como se ha documentado en otros sistemas, como el control de *Cercospora beticola* en betabel (Galletti *et al.*, 2008) y *Exserohilum turcicum* en maíz (Limdolphamand *et al.*, 2023), lo que sugiere la activación de mecanismos de resistencia sistémica inducida en la planta.

Efecto de la concentración de conidios. No se encontraron diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$) entre las dos concentraciones evaluadas, siendo la C1 (8.40 %^a) igual de efectiva que la C2 (8.76 %^a) en la reducción de la severidad. Este hallazgo es de gran relevancia práctica, ya que la dosis menor es más económica. La efectividad de concentraciones en el rango de 1×10^8 conidios mL^{-1} ha sido reportada en la reducción y control de enfermedades foliares en diversas plantas y comúnmente es utilizada en trabajos de invernadero (Galletti *et al.*, 2008; Limdolphamand *et al.*, 2023), para promover el crecimiento en jitomate (Celis-Perera *et al.*, 2023), controlar "damping off" en *Capsicum chinense* (Larios *et al.*, 2019) y mejorar la germinación de semillas de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*), lo que respalda la viabilidad de su uso a campo (Cubillos-Hinojosa *et al.*, 2009).

Influencia del estado sanitario inicial de la planta. Este fue un factor altamente significativo (Tukey, $p < 0.05$). Las plantas clasificadas inicialmente como asintomáticas presentaron una severidad promedio final significativamente menor (8.06 %^a) que las plantas que inicialmente eran sintomáticas (13.37 %^b). Esto indica que los tratamientos fueron más efectivos en condiciones de prevención que de curación. Las plantas asintomáticas, al poseer una mejor condición fisiológica, probablemente tuvieron una mayor capacidad para generar una respuesta de defensa robusta inducida por *Trichoderma* (Aswani *et al.*, 2022). Este resultado refuerza la importancia de implementar estrategias de biocontrol de manera preventiva dentro del manejo integrado de la roya.

Interacción entre *Trichoderma* y el estado sanitario. Se detectó un efecto de interacción significativo (Tukey, $p < 0.05$) en la efectividad de los tratamientos según la condición inicial de la planta. En plantas asintomáticas, el consorcio Th_Ta (5.99 %^{ab}) y *T. harzianum* (Th; 5.61 %^a) formaron el grupo estadístico de menor severidad, seguidos de *T. asperellum* (Ta; 8.61 %^{abc}). En contraste, en plantas sintomáticas, *T. asperellum* (Ta; 8.25 %^{abc}) fue la cepa más efectiva, mostrando una severidad estadísticamente igual a la de las plantas asintomáticas tratadas y significativamente menor que el consorcio (Th_Ta; 10.2 %^{cd}) y *T. harzianum* (Th; 12.8 %^{de}) en este grupo (Figura 1A).

Este resultado sugiere una especialización en los mecanismos de acción de las cepas. Mientras el consorcio (Th_Ta) parece ser ideal para una protección preventiva en plantas asintomáticas ("sanas"), posiblemente debido a una sinergia que potencia la inducción de defensas, *T. asperellum* (Ta) demostró una mayor capacidad para inducir una respuesta curativa o de contención en plantas sintomáticas ("enfermas"). Este efecto sistémico, mediado desde la rizosfera hacia el follaje, respalda firmemente la hipótesis de que *Trichoderma* activa mecanismos de resistencia sistémica en la planta. Este fenómeno, ampliamente documentado (Shoresh *et al.*, 2005), se manifiesta en la protección contra diversos patógenos foliares como *Cercospora beticola* (Galletti *et al.*, 2008), *Exserohilum turcicum* (Limdolphamand *et al.*, 2023) y *Phytophthora palmivora* (Sirikamonsathien *et al.*, 2023). Dicha activación conlleva la expresión de genes de defensa en tejidos distantes al sitio de la infección patógena, lo que constituye un sello característico de la resistencia sistémica inducida (Mukherjee *et al.*, 2012).

Interacción entre *Trichoderma* y la concentración. El efecto entre estos factores no fue significativo ($p > 0.05$). Esto confirma que la efectividad de ambas concentraciones (1×10^8 y 1×10^{12} conidios mL^{-1}) fue consistente para las diferentes cepas, independientemente de

que las plantas fueran inicialmente asintomáticas o sintomáticas, reforzando la recomendación de utilizar la dosis más baja (Figura 1D).

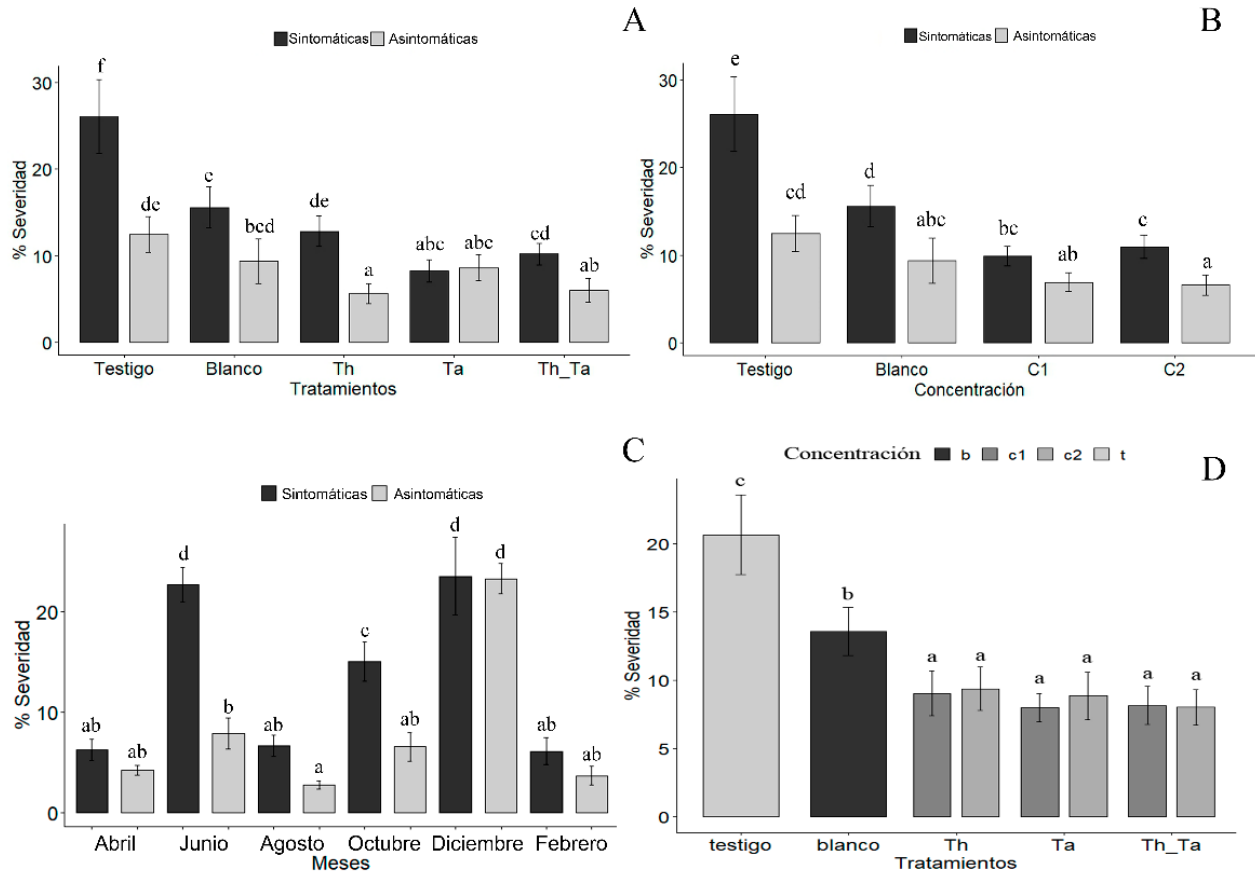


Figura 1. Efecto de los tratamientos con *Trichoderma* spp. en la severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en plantas sintomáticas y asintomáticas. **A)** Interacción entre tipo de planta (sintomática y asintomática) y tratamientos; **B)** Interacción entre tipo de planta y concentración: (C1 = 1×10^8 conidios mL^{-1} , C2 = 1×10^{12} conidios mL^{-1}); **C)** Variación de la severidad a lo largo del año; **D)** Interacción entre tratamientos y concentraciones. Las barras indican la media \pm error estándar. Las diferencias significativas se determinaron mediante ANOVA de medidas repetidas y prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Interacción entre la concentración y el estado sanitario. Se hallaron diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). El mayor beneficio de aplicar *Trichoderma* se obtuvo en plantas asintomáticas, donde ambas concentraciones, C2 (6.57 %^a) y C1 (6.90 %^{ab}), lograron el menor grado de severidad, formando un grupo estadístico de máxima eficacia. Por el contrario, en plantas sintomáticas, la severidad general fue mayor. Sin embargo, los tratamientos con *Trichoderma* en ambas concentraciones redujeron significativamente la enfermedad, comparado con el manejo convencional o blanco (16.69 %^d) y, especialmente, con el testigo (27.76 %^e) (Figura 1B). Este patrón demuestra que, si bien el estado sanitario inicial es determinante, la aplicación de *Trichoderma* ejerce un control significativo en ambos escenarios. La capacidad de mantener los niveles de severidad más bajos en plantas asintomáticas refuerza el concepto de que una planta con su sistema inmunológico intacto responde de manera más robusta a los elicitores microbianos, maximizando la expresión de la resistencia sistémica inducida (Aswani *et al.*, 2022; Shores *et al.*, 2005). Incluso en

plantas sintomáticas, la reducción de la severidad sugiere que *Trichoderma* es capaz de modular la fisiología de la planta para frenar el avance del patógeno. El hecho de que no exista una diferencia clara entre C1 y C2 incluso dentro de cada tipo de planta, refuerza la robustez y confiabilidad de la dosis más baja (1×10^8 conidios mL^{-1}) para su implementación práctica en campo, ya sea en estrategias preventivas o curativas.

Variación temporal de la severidad. Se encontró una fluctuación estacional altamente significativa ($F = 18.92$; $GL = 5$; $p < 0.001$), directamente influenciada por las condiciones climáticas de la región. Los valores más bajos se registraron durante los meses secos: agosto (4.71 %^a), febrero (4.89 %^a) y abril (5.23 %^a), donde las condiciones de alta radiación solar y baja precipitación limitan naturalmente la germinación de las uredosporas (Tonutti *et al.*, 2017). Por el contrario, los picos máximos de la enfermedad ocurrieron en los meses húmedos: junio (15.29 %^e), octubre (10.79 %^b) y especialmente diciembre (23.39 %^d). El incremento en la severidad durante estos meses coincide con periodos de mayor precipitación (Parada-Molina *et al.*, 2020) y con la concurrencia de alta humedad y temperaturas moderadas que crean el ambiente ideal para la germinación y dispersión del hongo (Avelino *et al.*, 2006; Hinnah *et al.*, 2020). Cabe destacar que el tipo de lluvia es determinante: intensas pueden lavar las esporas, mientras que lluvias ligeras o salpicaduras favorecen su germinación y dispersión en el envés de la hoja (Lasso *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023). Adicionalmente, el drástico pico en diciembre puede atribuirse a la dispersión mecánica de esporas facilitada por las labores de cosecha (Moreira-Morrillo *et al.*, 2023).

Efectividad de los tratamientos en el tiempo. El análisis de la interacción tratamiento por mes reveló que las combinaciones más efectivas fueron *T. harzianum* en febrero (1.86 %^a), *T. asperellum* en febrero (2.14 %^a), el consorcio Th_Ta en agosto (2.93 %^{ab}) y *T. harzianum* en agosto (3.55 %^{ab}), las cuales formaron el grupo estadístico de menor afectación. En contraste, las combinaciones de mayor severidad corresponden al testigo en diciembre (49.11 %ⁱ) y octubre (23.45 %ⁱ). Todos los tratamientos con *Trichoderma* mantuvieron la enfermedad significativamente controlada durante estos meses críticos (octubre-diciembre) (Figura 2). Este control bajo alta presión de inóculo sugiere que, *Trichoderma* indujo un estado de resistencia sistémica en la planta. Se ha demostrado que el género *Trichoderma* actúa como un elicitor, activando respuestas de defensa sistémicas en la planta huésped (Woo *et al.*, 2006). Mecanismos como la expresión de genes que codifican para quitinasas y β -1,3-glucanasas (Shoresh y Harman, 2008), así como la participación de rutas de señalización del ácido jasmónico y etileno (Mamani-Huayhua *et al.*, 2021), crean un estado de "alerta temprana" potenciado que permite a la planta responder con mayor eficacia a infecciones posteriores de patógenos foliares, como se ha observado en sistemas como frijol (Yedidia *et al.*, 2001) y pepino (Yedidia *et al.*, 2003).

La capacidad de las cepas aplicadas al suelo para reducir la severidad de un patógeno foliar respalda firmemente que este mismo mecanismo de resistencia sistémica inducida (Pocurull *et al.*, 2019) estuvo operando en el cultivo de café, siendo lo suficientemente potente como para mitigar la infección incluso bajo las condiciones ambientales más favorables para *H. vastatrix*.

Influencia del estado sanitario inicial en la dinámica temporal. El análisis de la interacción entre el estado sanitario inicial y el mes de evaluación reveló un patrón

significativo (Tukey, $p < 0.05$). Durante la mayor parte del año, las plantas asintomáticas mantuvieron una severidad significativamente menor que las sintomáticas.

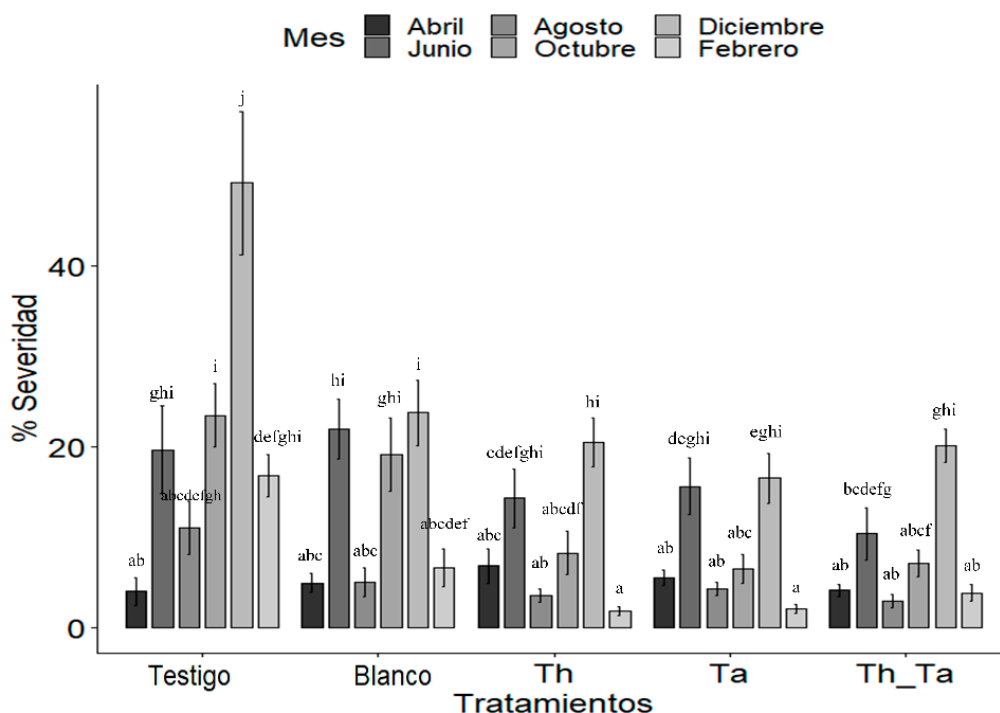


Figura 2. Interacción entre tratamientos con *Trichoderma* spp. y meses de evaluación sobre severidad de la roya del café. La figura muestra la evolución temporal de la severidad en plantas tratadas con *T. harzianum* (Th), *T. asperellum* (Ta), su consorcio (Th_Ta), el manejo convencional (blanco) y el testigo sin aplicación. Las barras representan la media \pm error estándar. Diferencias significativas determinadas mediante ANOVA de medidas repetidas ($p < 0.05$).

Esto fue particularmente evidente en los meses de junio, donde las asintomáticas (7.91 %^b) mostraron una severidad moderada, mientras que las sintomáticas alcanzaron uno de sus valores más altos (22.67 %^d). En octubre, las asintomáticas se mantuvieron en un grupo intermedio (6.55 %^{ab}) y las sintomáticas en un 15.03 %^c (Figura 1C). Sin embargo, el hallazgo más revelador de esta interacción se observó en el pico epidémico de diciembre. En este mes, tanto las plantas asintomáticas como las sintomáticas convergieron en el mismo grupo estadístico de máxima severidad (^d). Este resultado podría indicar que, bajo una presión de inóculo ambiental extremadamente alta, la ventaja inicial de estar sano se ve superada por la intensidad de la epidemia.

No obstante, los tratamientos con *Trichoderma* lograron modular la severidad gran parte del año. Esto indica que la aplicación del biocontrolador puede amortiguar la pérdida de la ventaja fisiológica en plantas inicialmente sanas y, al mismo tiempo, ofrecer un nivel de protección significativo a las plantas ya enfermas, posiblemente mediante la activación de los mecanismos de resistencia sistémica inducida que han sido previamente documentados (Pocurull *et al.*, 2019). En conjunto, estos resultados demuestran que la aplicación al suelo de *Trichoderma* spp., particularmente a una concentración de 1×10^8 conidios mL^{-1} , representa una estrategia confiable y económicamente viable para el manejo integrado de la roya del café, ofreciendo protección tanto preventiva como curativa y resultando más valiosa precisamente durante los períodos de mayor potencial de daño económico.

CONCLUSIONES

La aplicación al suelo de *Trichoderma* spp. es una estrategia efectiva para el manejo de la roya del café. La efectividad fue consistente entre las cepas evaluadas, destacando el consorcio de *T. harzianum* y *T. asperellum* en plantas asintomáticas para protección preventiva, y *T. asperellum* en plantas sintomáticas por su acción curativa. La concentración de 1×10^8 conidios mL^{-1} demostró ser igual de efectiva que dosis mayores, lo que representa la opción más viable por su menor costo. La cuantificación objetiva con el paquete Pliman validó que la mayor eficacia del biocontrol ocurre durante los meses epidémicos de octubre a diciembre, cuando la severidad de la roya es naturalmente más alta. Por lo tanto, la incorporación de *Trichoderma* en los esquemas de manejo integrado se justifica como una práctica confiable, económica y de base biológica para reducir la severidad de *H. vastatrix* en condiciones de campo.

Limitaciones

Este trabajo no incluyó la medición de variables microclimáticas *in situ* para correlacionarlas cuantitativamente con la severidad, ni se cuantificó la colonización radical de *Trichoderma*, por lo que su establecimiento y persistencia se infieren de los efectos observados en el follaje.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Financiamiento

Se agradece el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías CONAHCyT por la beca otorgada (892218) en el Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias.

Agradecimientos

Al Ing. Emmanuel Herrera Martinez productor y coordinador de la Finca los Barreales y al Dr. Mauricio Luna Rodriguez por el acceso al Laboratorio de Genética.

Contribución de los autores

Sandra Lizveth Enriquez Lopez: redacción del artículo, análisis de datos, ejecución experimental. Gerardo Alvarado Castillo: Supervisión del proyecto, interpretación de los resultados y revisión crítica del manuscrito. Carlos Roberto Cerdan Cabrera: Asesoría en la interpretación de resultados, apoyo metodológico. Rosalba Argumedo Delira: Apoyo en asesorías y análisis crítico del proyecto. Esteban Escamilla Prado: Colaboración en la interpretación de resultados.

Material Suplementario

No se incluyó material suplementario para este artículo.

REFERENCIAS

- Alfonso ET, Leyva Á y Hernández A. 2005. Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate *Lycopersicon esculentum*, Mill. Revista Colombiana de Biotecnología 7:47-54. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77670207>
- Alvarado-Castillo G, Benítez-Badillo G, Lozada-García JA, Ortiz-Ceballos GC and Torres-Pelayo V. 2017. Uredospores' mycelium germination inhibition of coffee rust *Hemileia vastatrix* through three alternative compounds: First study. Wulfenia Journal 24:65-78. https://www.researchgate.net/profile/Alvarado-Castillo-Gerardo/publication/325128059_Uredospores/
- Aswani R, Thomas R and Radhakrishnan EK. 2022. Induction of plant defense response by endophytic microorganisms. En: Biocontrol Mechanisms of Endophytic Microorganisms. Elsevier. 89-115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88478-5.00002-X>
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, et al. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America 2008-2013: Impacts, plausible causes and proposed solutions. Food Security 7:303-321. <https://doi.org/10/gg2krm>
- Avelino J, Zelaya H, Merlo A, Pineda A, Ordoñez M, et al. 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. Ecological Modelling 197:431-447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.013>
- Barbedo JGA. 2014. An automatic method to detect and measure leaf disease symptoms using digital image processing. Plant Disease 98:1709-1716. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-14-0290-RE>
- Bock CH, Barbedo JGA, Del Ponte EM, Bohnenkamp D and Mahlein AK. 2020. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. Phytopathology Research 2:9. <https://doi.org/10.1186/s42483-020-00049-8>
- Boudrot A, Pico J, Merle I, Granados E, Vilchez S, et al. 2016. Shade effects on the dispersal of airborne *Hemileia vastatrix* uredospores. Phytopathology 106:572-580. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R>
- Calderón G. 2016. *Hemileia vastatrix* Berkeley y Broome. Ficha Técnica No. 40. 23 p. chrome-extension://efaidnbmnmbpcjpcglclefindmkaj/<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafeto.pdf> (Consulta: enero, 2024).
- Capucho AS, Zambolim L, Duarte HSS y Vaz GRO. 2011. Development and validation of a standard area diagram set to estimate severity of leaf rust in *Coffea arabica* and *C. canephora*. Plant Pathology 60:1144-1150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02472.x>
- Celis-Perera SE, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A, Garruña-Hernández R, Tun-Suarez JM, et al. 2023. *Trichoderma asperellum* Ta13-17 en el crecimiento de *Solanum lycopersicum* y biocontrol de *Corynespora cassiicola*. Revista Mexicana de Fitopatología 41:70-81. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2207-1>
- Chambe MES. 2020. Control biológico *Trichoderma* spp. y químico de roya amarilla *Hemileia vastatrix* berk y br. del café (*Coffea arabica* L) en la provincia de Sandia-Puno. Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional 6:500-520. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9548845>.
- Cubillos-Hinojosa J, Valero N y Mejía L. 2009. *Trichoderma harzianum* como promotor del crecimiento vegetal del maracuyá *Passiflora edulis* var. Flavicarpa Degener. Agronomía Colombiana 27:81-86. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652009000100011&lng=en&tlng=es
- Enríquez-López SL, Alvarado-Castillo G, Cerdán-Cabrera CR, Argumedo-Delira R, et al. 2025. Assessment of *Hemileia vastatrix* Severity in *Coffea arabica* L., using Image Analysis (Pliman). Agro Productividad. <https://doi.org/10.32854/agrop.v18i2.3252>
- Escamilla PE. 2021. Experiencia de Catuai Amarillo en el marco de la producción orgánica y el comercio justo. Interconectando Saberes 6:165-175. <https://doi.org/10.25009/is.v0i12.2715>
- Gallego-Sánchez LM, Canales FJ, Montilla-Bascón G and Prats E. 2020. RUST: A Robust, User-Friendly Script Tool for Rapid Measurement of Rust Disease on Cereal Leaves. Plants 9:1182. <https://doi.org/10.3390/plants9091182>
- Galletti S, Burzi PL, Cerato C, Marinello S and Sala E. 2008. *Trichoderma* as a potential biocontrol agent for *Cercospora* leaf spot of sugar beet. BioControl 53:917-930. <https://doi.org/10.1007/s10526-007-9113-1>
- Haddad F, Maffia LA, Mizubuti ESG y Teixeira H. 2009. Biological control of coffee leaf rust by antagonistic bacteria under field conditions in Brazil. Biological Control 49:114-119. <https://doi.org/10/bw25qc>
- Harman GE, Howell CR, Viterbo A, Chet I and Lorito M. 2004. *Trichoderma* species-opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology 2:43-56. <https://doi.org/10/cg9m2q>
- Hinnah FD, Sentelhas PC, Alves Patrício FR, Paiva RN and Parenti MV. 2020. Performance of a weather-based forecast system for chemical control of coffee leaf rust. Crop Protection 137:105225. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105225>
- Larios LEJ, Valdovinos-Nava JJW, Chan-Cupul W, García-López FA, Manzo-Sánchez G, et al. 2019. Biocontrol de Damping off y promoción del crecimiento vegetativo en plantas de *Capsicum chinense* Jacq con *Trichoderma* spp. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10:471-483. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.332>
- Lasso E, Corrales DC, Avelino J, de Melo-Virginio-Filho E and Corrales JC. 2020. Discovering weather periods and crop properties favorable for coffee rust incidence from feature selection approaches. Computers and Electronics in Agriculture 176:105640. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105640>

- Li K, Hajian-Forooshani Z, Vandermeer J and Perfecto I. 2023. Coffee leaf rust *Hemileia vastatrix* is spread by rain splash from infected leaf litter in a semi-controlled experiment. *Journal of Plant Pathology* 105:667-672. <https://doi.org/10.1007/s42161-023-01404-2>
- Limdolphamand S, Songkumarn P, Suwannarat S, Jantasorn A and Dethoup T. 2023. Biocontrol efficacy of endophytic *Trichoderma* spp. in fresh and dry powder formulations in controlling northern corn leaf blight in sweet corn. *Biological Control* 181:105217. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105217>
- López-Vásquez JM, Marín-Ramírez G, Gaitán A y Ángel CA. 2018. Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya del café. *Avances Técnicos Cenicafe* 498:1-8. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cenicafe.org/es/publications/AT_GOTERA.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/AT_GOTERA.pdf)
- Mamani-Huayhua G, Leon-Ttacca B, Palao-Iturregui LA y Borja-Loza YR. 2021. Biocontrol de la roya amarilla del café *Hemileia vastatrix* Berk. y Br. con cepas de *Trichoderma* sp. Endófito. *Cultivos Tropicales* 42:e05. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362021000400001&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Martínez B, Reyes Y, Infante D, González E, Baños H, et al. 2008. Selección de aislamientos de *Trichoderma* spp. candidatos a biofungicidas para el control de *Rhizoctonia* sp. en arroz. *Revista de Protección Vegetal* 23:118-125. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522008000200009&lng=es&tlng=es
- Michel-Aceves AC, Hernández-Morales J, Toledo-Aguilar R, Sabino-López JE y Romero-Rosales T. 2019. Capacidad antagonista de *Trichoderma* spp. nativa contra *Phytophthora parasitica* y *Fusarium oxysporum* aislados de cultivos de Jamaica. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:235-241. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.235-241>
- Michel-Aceves AC, Otero-Sánchez MA, Martínez-Rojero RD, Rodríguez-Morán NL, Ariza-Flores R, et al. 2008. Producción masiva de *Trichoderma harzianum* Rifai en diferentes sustratos orgánicos. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14:185-191. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2008000200012&lng=es&tlng=es
- Moreira-Morrillo AA, Vélez-Zambrano JP, Moreira SI y Garcés-Fiallos FR. 2023. Enfermedades que afectan el cultivo de café: elucidando el ciclo de vida de roya, mal de hilachas y *cercosporiosis*. *Scientia Agropecuaria* 14:395-412. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.035>
- Mukherjee M, Mukherjee PK, Horwitz BA, Zachow C, Berg G, et al. 2012. *Trichoderma*-plant-pathogen interactions: advances in genetics of biological control. *Indian Journal of Microbiology* 52:522-529. <https://doi.org/10.1007/s12088-012-0308-5>
- Mutka AM and Bart RS. 2015. Image-based phenotyping of plant disease symptoms. *Frontiers in Plant Science* 5:734. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00734>
- Nava-Tablada ME. 2012. Migración internacional y cafecultura en Veracruz, México. *Migraciones Internacionales* 6:139-171. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-89062012000300005&lng=es&tlng=es
- Olivoto T, Andrade SMP and Del Ponte EM. 2022. Measuring plant disease severity in R: introducing and evaluating the pliman package. *Tropical Plant Pathology* 47:95-104. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00487-5>
- Parada-Molina PC, Cerdán CR, Ortiz-Ceballos G, Barradas-Miranda VL y Cervantes-Pérez J. 2020. *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7:e2507. <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2507>
- Pocurull M, Fullana AM, Ferro M, Valero P, Escudero N, et al. 2019. Commercial formulations of *Trichoderma* induce systemic plant resistance to *Meloidogyne incognita* in tomato and the effect is additive to that of the Mi-1.2 resistance gene. *Frontiers in Microbiology* 10:3042. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.03042>
- Quispe-Apaza C, Mansilla-Samaniego R, Espejo-Joya R, Bernacchia G, Yabar-Larios M, et al. 2021. Spatial and temporal genetic diversity and population structure of *Hemileia vastatrix* from Peruvian coffee plantations. *The Plant Pathology Journal* 37:280-290. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.10.2020.0192>
- Ramírez-Rodríguez RF, Castañeda-Hidalgo E, Robles C, Santiago-Martínez GM, Pérez-León MI, et al. 2020. Efectividad de biofungicidas para el control de la roya en plántulas de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11:1403-1412. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2614>
- Schneider CA, Rasband WS and Eliceiri KW. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9:671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Sharma A, Salwan R, Kaur R, Sharma R and Sharma V. 2022. Characterization and evaluation of bioformulation from antagonistic and flower inducing *Trichoderma asperellum* isolate UCRD5. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 43:102437. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102437>
- Shoresh M and Harman GE. 2008. The molecular basis of shoot responses of maize seedlings to *Trichoderma harzianum* T22 inoculation of the root: a proteomic approach. *Plant Physiology* 147:2147-2163. <https://doi.org/10.1104/pp.108.123810>
- Shoresh M, Yedidia I and Chet I. 2005. Involvement of jasmonic acid/ethylene signaling pathway in the systemic resistance induced in cucumber by *Trichoderma asperellum* T203. *Phytopathology* 95:76-84. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0076>
- SIAP. 2022. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap> (Consulta: marzo, 2024).
- Sirikamonsathien T, Kenji M and Dethoup T. 2023. Potential of endophytic *Trichoderma* in controlling *Phytophthora* leaf fall disease in rubber *Hevea brasiliensis*. *Biological Control* 179:105175. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105175>

- Toniutti L, Breitler JC, Etienne H, Campa C, Doubeau S, *et al.* 2017. Influence of environmental conditions and genetic background of Arabica coffee (*C. arabica* L.) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Frontiers in Plant Science* 8:2025. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02025>
- Woo SL, Scala F, Ruocco M and Lorito M. 2006. The molecular biology of the interactions between *Trichoderma* spp., phytopathogenic fungi, and plants. *Phytopathology* 96:181-185. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0181>
- Yao X, Guo H, Zhang K, Zhao M, Ruan J, *et al.* 2023. *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology* 14:1160551. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
- Yáñez-Hernández O, Ríos-Lira A, Pantoja-Pacheco YV, Jiménez-García JA, Vázquez-López JA, *et al.* 2023. Increase of *Trichoderma harzianum* production using mixed-level fractional factorial design. *Applied Sciences* 13:9244. <https://doi.org/10.3390/app13169244>
- Yedidia I, Shoresh M, Kerem Z, Benhamou N, Kapulnik Y, *et al.* 2003. Concomitant induction of systemic resistance to *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans* in cucumber by *Trichoderma asperellum* T-203 and accumulation of phytoalexins. *Applied and Environmental Microbiology* 69:7343-7353. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.12.7343-7353.2003>
- Yedidia I, Srivastva AK, Kapulnik Y and Chet I. 2001. Effect of *Trichoderma harzianum* on microelement concentrations and increased growth of cucumber plants. *Plant and Soil* 235:235-242. <https://doi.org/10/c38s2x>