

Reducción de la severidad de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1 en banano Gros Michel mediante microorganismos con diferentes mecanismos de antagonismo

Using microorganisms with different antagonism mechanisms to reduce the severity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 in Gros Michel bananas



Miguel Hoyos¹, Pedro Terrero²

Siembra 12 (2) (2025): e8195

Recibido: 08/05/2025 / Revisado: 23/06/2025 / Aceptado: 16/10/2025

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Estación Experimental Tropical Pichilingue, Departamento de Protección Vegetal. Km 5 Vía Quevedo – El Empalme. EC120313. Mocache, Los Ríos, Ecuador.

✉ miguel.hoyos811@gmail.com

✉ <https://orcid.org/0009-0001-6993-419X>

² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Estación Experimental Tropical Pichilingue, Programa de Banano, Plátano y otras musáceas. Km 5 Vía Quevedo – El Empalme. EC120313. Mocache, Los Ríos, Ecuador.

✉ pedro.terrero@iniap.gob.ec

✉ <https://orcid.org/0000-0002-4492-4577>

* Autor de correspondencia:

miguel.hoyos811@gmail.com.

Resumen

La marchitez vascular por *Fusarium* de las musáceas, causada por cepas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [Foc], sólo se han manejado eficazmente con el uso de variedades con niveles de resistencia genética. Además de la resistencia genética, el uso de estrategias de manejo del cultivo enfocadas en la salud del suelo y aquellas que contribuyan a mantener duradera la resistencia disponible también son una opción con impacto en la reducción de intensidad de epidemia. Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de agentes de control biológico con diferente mecanismo de antagonismo en los componentes de la epidemia de *Fusarium* de las musáceas en condiciones de invernadero, utilizando como modelo el patosistema Foc raza 1 [R1]-banano Gros Michel. Los experimentos en condiciones controladas mostraron que la aplicación de agentes de control biológico en plantas de banano Gros Michel, antes y después de la inoculación de *Fusarium*, genera diferentes niveles de intensidad de daño del patógeno en la planta. Cuando se aplicaron agentes de control biológico a un suelo contaminado antes de la siembra de las plantas, la aparición de síntomas se retrasó, así como la severidad de daño causada por el patógeno debido a la competencia y antibiosis. Ningún tratamiento impidió la infección del patógeno, pero si retrasaron el tiempo de aparición de síntomas y la intensidad del daño, por tanto, el efecto de microorganismos puede ser potencial para disminuir la severidad de la enfermedad en condiciones de manejo óptimas, pero es necesario realizar evaluaciones en campo.

Palabras clave: marchitez vascular, control biológico, antagonismo.

Abstract

Fusarium vascular wilt of Musaceae, caused by strains of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [Foc], has only been effectively managed by using genetically resistant varieties. In addition to genetic resistance, crop management strategies that focus on soil health and maintain long-lasting resistance can also impact the intensity of the epidemic. This study evaluated the effects of applying biological control agents with different antagonistic mechanisms on components of the *Fusarium* epidemic in Musaceae under greenhouse conditions. The study used the Foc

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>
ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral
vol. 12, núm 2, 2025

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i2.8195>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

race 1 [R1]-Gros Michel banana pathosystem as a model. Experiments under controlled conditions revealed that applying biological control agents to Gros Michel banana plants before and after *Fusarium* inoculation results in varying degrees of pathogen damage to the plant. When the biological control agents were applied to contaminated soil before planting, the onset of symptoms and the severity of the damage caused by the pathogen were delayed due to competition and antibiosis. While none of the treatments prevented infection by the pathogen, they delayed the timing of symptoms and reduced severity of damage. Therefore, under optimal management conditions, microorganisms may have the potential to reduce disease severity, but field evaluations are needed.

Keywords: vascular wilt, biological control, antagonism.

1. Introducción

La marchitez vascular del banano [MVB] es la enfermedad limitante con más importancia en este cultivo tropical, causada por cepas del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. La raza 1 [R1] de este patógeno a mediados del siglo pasado devastó las plantaciones comerciales de banano Gros Michel. En la actualidad, la raza 4 tropical [R4T] representa un riesgo para las plantaciones de banano Cavendish, cultivar resistente que se estableció en plantaciones que habían sido devastadas por Foc R1 (Drenth y Kema, 2021; García-Bastidas, 2022). La estrategia más eficiente para la gestión de esta enfermedad es la resistencia genética (como evidencia el siglo pasado), pero actualmente no se dispone de una variedad con resistencia completa a la R4T y con aceptación en el mercado de exportación basado en cultivares del grupo Cavendish. A pesar de la disponibilidad de cultivares como Formosana, promovido como tolerante a Foc R4T y aceptado en el mercado por ser un tipo Cavendish (Munhoz et al., 2024), en condiciones experimentales se han reportado diferentes niveles de susceptibilidad después del primer ciclo de producción, ocasionando que haya dudas de su utilidad como reemplazo a los cultivares Cavendish altamente susceptibles (Viljoen et al., 2020).

En el caso de cultivares con resistencia cuantitativa (Formosana), la disminución del nivel de inóculo a un umbral que pueden soportar o el establecimiento de factores bióticos y abióticos que permitan mantener su resistencia pueden contribuir a mantener su producción por más de un ciclo en suelos infectados (García-Bastidas et al., 2024; Munhoz et al., 2024). El uso de agentes de control biológico [ACB] cada vez aparenta ser una estrategia importante de gestión de la enfermedad con el objetivo de supresión del patógeno, tanto por la tendencia de reducción del uso de productos químicos como por las limitadas opciones disponibles y eficaces para controlar enfermedades. Bubici et al. (2019) realizaron una revisión extensa del uso de ACB contra la marchitez por *Fusarium* del banano, en esta revisión resaltan efectos de control con especies prometedoras en condiciones controladas, pero también abordan la necesidad de generar estrategias del uso de microorganismos en condiciones específicas del cultivo. La supresión de la enfermedad está asociada a la presencia de ACB en el suelo, que dificultan o impiden el establecimiento de patógenos en el suelo (Huang et al., 2019).

El uso de ACB es una de las opciones que ha generado resultados prometedores en experimentos conducidos en condiciones controladas, los compuestos producidos por los microorganismos han sido eficaces en ensayos *in vitro* contra Foc en banano cv. Williams, sin embargo, los resultados no se han replicado en campo (Bubici et al., 2019). Bubici et al. (2019) cuestionan si la efectividad observada en estrategias individuales basadas en microorganismos, como el caso de *Trichoderma* para el control de la R4T serán aplicables en condiciones productivas en campo. El uso de ACB no ha sido útil para suprimir la enfermedad totalmente, pero en condiciones controladas se ha observado disminución de la incidencia con el uso de especies de los géneros *Trichoderma* o *Pseudomonas* (Hernández-Melchor et al., 2023; Nel et al., 2006). El uso combinado de *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens* mostró un efecto sinérgico para controlar la infección de *Fusarium* en banano, reduciendo la severidad de la marchitez en un 60% comparado con un control sin tratamiento (Solórzano et al., 2025).

La severidad de las epidemias de Foc en banano generalmente está determinada por tres componentes: i) dispersión del patógeno, ii) cantidad de inóculo primario y, iii) tasa de infección y desarrollo de la enfermedad (Román Jeri, 2012). Las prácticas orientadas a no permitir la acumulación de inóculo en el suelo (mayormente por efecto de los ACB) podrán ser suficiente para que el inóculo residual sea bloqueado por la resistencia del cultivar (Parlevliet, 1993; Zadoks, 1993). Además de considerar los componentes epidemiológicos en los que la aplicación de ACB tendrá efecto, también es importante estudiar los mecanismos que los ACB tienen en los patógenos y en las plantas (Bubici et al., 2019). Debido a que las marchitez vasculares causadas por *F.*

oxysporum no tienen cura, el manejo se debe abordar con enfoque preventivo, por esto, es necesario estudiar la supresividad biótica de forma integral en un programa de manejo de la enfermedad, buscando la rehabilitación productiva en plantaciones afectadas (García-Bastidas et al., 2024; Munhoz et al., 2024).

En este estudio se combinó un enfoque experimental que utiliza como modelo a la raza 1 de Foc en plantas de banano Gros Michel con la aplicación de ACB en diferentes condiciones epidemiológicas con el objetivo de explorar el impacto en los componentes de la epidemia de Foc R1, también se probaron diferentes mecanismos de antagonismo de los ACB para reducir la intensidad de los síntomas de Foc R1 en condiciones controladas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Colecta de cepas fúngicas y bacterianas

Se identificaron plantaciones de banano Gros Michel con síntomas de infección de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [Foc R1] ubicadas en las provincias de Pichincha, Imbabura, Bolívar, Los Ríos, Guayas y Manabí. En las visitas realizadas a las fincas entre junio del 2023 y agosto del 2024 se colectaron muestras de suelo rizosférico y tejido vegetal de las plantas que mostraron síntomas de marchitez por *Fusarium*. Las muestras se trasladaron al Laboratorio de Fitopatología del Departamento de Protección Vegetal [DPV], perteneciente a la Estación Experimental Tropical Pichilingue [EETP] del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP].

Para el aislamiento de microorganismos en laboratorio se cortaron fragmentos de tejido vegetal de 5 mm y se lavaron por dos minutos con una solución de hipoclorito de sodio al 10%, después se realizaron tres enjuagues con agua destilada estéril y se sembraron en medio de cultivo PDA y Agar Nutriente (DIFCO, USA). Se suspendieron 20 g de suelo de cada muestra en 180 ml de agua destilada y se agitó por cinco minutos, luego se realizaron cuatro diluciones seriadas (1/10), se sembraron 100 ul de cada dilución en los mismos medios de cultivo y se incubaron en oscuridad a 25°C. Después de cinco días, se obtuvieron cultivos puros en medio estéril y se incubaron en las mismas condiciones.

2.2. Caracterización de microorganismos

Los microorganismos aislados se identificaron y agruparon según sus características morfológicas y microscópicas (Delgado-Baquerizo et al., 2018; Watanabe, 2002), las colonias originales se conservan en el Laboratorio de Fitopatología de la EETP del INIAP. Se descartaron los microorganismos patogénicos, la patogenicidad se probó en plantas de banano Gros Michel inoculadas de forma artificial, con vertido de suspensión de esporas en suelo e inyección en tejido vegetal, se descartaron todos los aislamientos que generaron lesiones en las plantas.

Primero se identificó el modo de antagonismo siguiendo la clasificación propuesta por Avis et al. (2008), que se resumen en la Tabla 1. Todas las pruebas de antagonismo directo se realizaron con Foc R1 (aislamiento SC-Fo-043, conservado en la Estación Experimental Santa Catalina - EESC).

Tabla 1. Clasificación de mecanismos de antagonismo adaptada de Avis et al. (2008).

Table 1. Classification of antagonism mechanisms, adapted from Avis et al. (2008).

Tipo de efecto	Modo	Mecanismo
Directo	Competencia	Consumo de carbohidratos
		Sitios de infección radicular
	Depredación	Micoparasitismo
		Producción de enzimas líticas
Indirecto	Antibiosis	Metabolitos secundarios volátiles y no volátiles
		Inducción de resistencia sistémica
	Fortalecimiento de la planta	Estimulación de crecimiento

Los efectos directos de antagonismo se identificaron con pruebas en medio de cultivo en placas Petri (Villavicencio-Vásquez et al., 2025). Para el modo de competencia se utilizó la técnica de crecimiento dual, confrontando al microorganismo antagonista con Foc R1 (Ghanbarzadeh et al., 2014). Para el modo de depredación, se observaron con un microscopio con contraste de fases (Eclipse Si E200, Nikon, USA) las interacciones entre las hifas de los hongos patógenos y antagonistas que crecieron en la misma placa del experimento para el modo de competencia (Guzmán-Guzmán et al., 2019). Los efectos indirectos de antagonismo se identificaron con un ensayo de observación en plantas de banano Gros Michel de tres semanas de edad, sembradas en sustrato estéril compuesto por tierra y arena en proporción 4:1.

Para identificar el modo de fortalecimiento de la planta se realizaron tres aplicaciones de una suspensión de microorganismos (1×10^6 esporas ml^{-1}) en dos grupos de plantas, un grupo inoculado con Foc R1 y otro grupo sin inoculación de ningún patógeno. Además, se evaluó la capacidad de los microorganismos seleccionados para establecerse en el suelo, para ello, se tomaron muestras de suelo dos meses después de la última aplicación y se cuantificaron las esporas presentes por gramo de suelo. Para el modo de antibiosis se expuso una suspensión de esporas de Foc R1 a una suspensión del microorganismo antagonista, y tras cinco minutos de exposición, se sembraron diluciones del tratamiento en PDA para cuantificar las colonias que germinaron del patógeno (Rashad y Abdel-Azeem, 2020).

Por último, se realizó la identificación molecular de los microorganismos seleccionados mediante amplificación de dos regiones genéticas con secuenciación Sanger. Para los hongos se utilizó el factor de elongación de la traducción 1-a(TEF1) y la región ITS1 del ADN ribosómico, para las bacterias se utilizó la subunidad pequeña del ADNr (16s) y la subunidad b de la ARNp (rpoB).

2.3. Ensayos de control biológico

Para los ensayos *in vivo* se seleccionaron cuatro ACB que se aislaron del medio natural y se identificaron en laboratorio, cada microorganismo seleccionado es representativo de un modo de antagonismo descrito en la Tabla 1. Como material vegetal se utilizaron plantas de banano Gros Michel que se sembraron en fundas plásticas de un litro de capacidad que contenía tierra negra, pomina y arcilla en proporción 4:1:1, y se aclimataron por 15 días hasta la aplicación de tratamientos. Los experimentos con plantas se condujeron en el invernadero de Fitopatología en la EETP.

Los tratamientos resultaron de implementar la aplicación de ACB de diferente modo de antagonismo como estrategia de manejo de la marchitez por *Fusarium* de las musáceas bajo dos escenarios epidemiológicos: uno con la presencia de la enfermedad y otro sin ella (Dita et al., 2018). En estos dos escenarios, se planteó que cada modo de antagonismo puede tener efecto en los componentes de la epidemia de *Fusarium* (período de incubación, incidencia, severidad y nivel de colonización vascular) en las musáceas (Román Jeri, 2012; Shen et al., 2019).

Después de la inoculación las plantas se monitorearon cada cinco días siguiendo un método mejorado para fenotipar la marchitez por *Fusarium* en banano (García-Bastidas et al., 2019). El período de incubación se estableció como los días transcurridos desde la inoculación hasta el amarillamiento de la hoja más vieja (considerado como un síntoma inicial de marchitez) en dos de las tres plantas que componen cada unidad experimental. La incidencia se registró como el porcentaje de plantas enfermas en relación con el número de plantas inoculadas, el valor se expresó para cada unidad experimental. La severidad se evaluó con una escala que clasifica al porcentaje de hojas marchitas en una escala de 1 a 4 en la que 1= 0-25%, 2= 26-50%, 3= 51-75% y 4= 76-100%. La colonización vascular se evaluó con un método destructivo, las plantas se lavaron y cortaron transversalmente a la altura del rizoma, se registró el porcentaje de área de tejido necrosada con una escala visual de intervalos de 10%.

El ensayo de control biológico se condujo bajo un diseño completamente aleatorizado [DCA] con cinco observaciones, cada unidad experimental estuvo representada por tres plantas. Se aplicaron nueve tratamientos que consistieron en: la interacción entre los dos escenarios epidemiológicos y los cuatro modos de antagonismo, más un control negativo inoculado con Foc R1 sin aplicación de microorganismos (Tabla 2). Los datos de las variables se analizaron con un ADEVA, y en las variables con diferencias estadísticas se buscó la diferencia menos significativa [LSD], los datos se registraron en una hoja de cálculo de Microsoft 365 y se procesaron con el paquete estadístico STATAMP 17.

La inoculación de Foc R1 se realizó siguiendo el método de vertido de esporas (García-Bastidas et al., 2019). La inoculación de todas las plantas se realizó con una suspensión de 1×10^6 esporas ml^{-1} del aislamiento

SC-Fo-043 de Foc R1, la suspensión de esporas se preparó añadiendo esporas de Foc R1 en medio de cultivo caldo Papa Dextrosa (DIFCO, USA) e incubando a 25°C en un agitador orbital a 120 rpm por cinco días.

Tabla 2. Tratamientos implementados en el ensayo de control biológico.

Table 2. Treatments implemented in the biological control test.

Número	Tratamiento	Descripción
1	A1 (Ta) - C	Inoculación de Foc R1 antes de aplicación de microorganismo con competencia
2	A2 (Th) - D	Inoculación de Foc R1 antes de aplicación de microorganismo con depredación
3	A3 (Bs) - A	Inoculación de Foc R1 antes de aplicación de microorganismo con antibiosis
4	A4 (B) - F	Inoculación de Foc R1 antes de aplicación de microorganismo con fortalecimiento de la planta
5	B1 (Ta) - C	Inoculación de Foc R1 después de aplicación de microorganismo con competencia
6	B2 (Th) - D	Inoculación de Foc R1 después de aplicación de microorganismo con depredación
7	B3 (Bs) - A	Inoculación de Foc R1 después de aplicación de microorganismo con antibiosis
8	B4 (B) - F	Inoculación de Foc R1 después de aplicación de microorganismo con fortalecimiento de la planta
9	Control	Inoculación de Foc R1 sin aplicación de microorganismos

La aplicación de ACB se realizó con dos semanas de diferencia para la condición de presencia (tratamientos 1-4) y ausencia de enfermedad (tratamientos 5-8), después y antes de la inoculación de Foc, respectivamente. En el caso de *Trichoderma* sp. se aplicó en cada planta 50 ml de una suspensión de 1×10^6 esporas ml^{-1} , la concentración se determinó con un recuento de esporas en un hematocímetro con ayuda de un microscopio óptico. En el caso de *Bacillus* sp., se aplicó en cada planta 25 ml de una suspensión de 1×10^7 células ml^{-1} , la concentración se determinó con un espectrofotómetro de luz visible (SP-MUV8000T, Bioevopeak, China) a 600 nm de longitud de onda y 0,1 de absorbancia. Tanto la aplicación de hongos como bacterias se repitió de la misma forma siete días después de la primera aplicación.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización y selección de microorganismos

La caracterización morfológica permitió la agrupación de los aislamientos de hongos y bacterias (según sus características microscópicas y macroscópicas en medio de cultivo), preliminarmente se identificaron a los géneros *Trichoderma* y *Bacillus*. La confirmación molecular se realizó mediante la amplificación y secuenciación de las regiones ITS1 y TEF1 para los hongos, y 16s rRNA y *rpoB* para las bacterias, cuyos fragmentos mostraron entre 97,6 y 99,3% de similitud con secuencias depositadas en el GenBank (datos pendientes de publicar). El servicio de identificación molecular fue realizado por el laboratorio IDGEN, quien proporcionó los resultados de secuenciación y el análisis de similitud con la base de datos GenBank.

En las colectas realizadas en zonas de producción de musáceas, se aislaron nueve hongos y nueve bacterias con características morfológicas diferentes. De los 18 microorganismos que se sometieron a las pruebas cualitativas de modo de antagonismo (datos no presentados), se seleccionaron cuatro microorganismos, uno por cada modo (Tabla 3) para los ensayos en plantas.

Los 18 microorganismos mostraron al menos dos modos de antagonismo, se descartaron aquellos con efectos bajos de antagonismo observados y se seleccionaron los que mostraron un modo de antagonismo con efecto notorio observado porque se buscó estudiar el efecto individual de los mecanismos de antagonismo de los microorganismos en la epidemia de Foc (Zheng et al., 2024). En la selección, se excluyeron los microorganismos que se establecieron fácilmente en el suelo porque pueden tener un impacto ecológico en los ambientes a los que sean introducidos, y si no se realiza un estudio de impacto ambiental antes de la aplicación de microorganismos foráneos es posible que se ocasione el desplazamiento de microorganismos nativos que contribuyan a tener niveles de supresividad mayores que en los consorcios microbianos artificiales (Gomes et al., 2020).

Tabla 3. Modos de antagonismo de los microorganismos seleccionados para las pruebas *in vivo*.
Table 3. Modes of antagonism of the microorganisms selected for the *in vivo* test.

Código	Identidad	Competencia	Depredación	Antibiosis	Fortalecimiento de la planta	Establecimiento en el suelo
LR-1.3	<i>Trichoderma asperellum</i>	X	X			
I-1.1	<i>Trichoderma harzianum</i>		X		X	X
LR-1.4	<i>Bacillus subtilis</i>			X		
B-1.6	<i>Bacillus</i> sp.				X	

Los mecanismos de antagonismo que expresaron los ACB seleccionados en este estudio, al igual que los que se resumen en la revisión que realizaron Bubici et al. (2019), son diversos, complejos y en la mayoría de los casos se presentan de forma combinada. Con los experimentos realizados *in vitro*, la respuesta múltiple observada en la mayoría de los microorganismos es un fenómeno común (Vinale y Sivasithamparam, 2020), pero es posible que los ensayos planteados no sean los más adecuados para identificar de forma cuantitativa la interacción entre microorganismo y patógeno. Por ejemplo, Keswani et al. (2014) indican que la producción de metabolitos secundarios en especies de *Trichoderma* es mayor cuando el microorganismo crece en condiciones de estrés. En los experimentos de identificación de mecanismo de antagonismo las condiciones fueron óptimas para el crecimiento de los microorganismos en medio de cultivo, lo que pudo ocasionar que no se exprese todo el potencial de producción de metabolitos secundarios en hongos.

Tradicionalmente, se han utilizado pruebas *in vitro* como criterio para seleccionar y clasificar microorganismos con potencial de control biológico (Mayorga Morejón et al., 2024), en estos casos, probablemente, trabajar con la fase saprófita de los microorganismos no siempre tendrá la misma respuesta que la fase parásita o patógena (Vinale et al., 2008). En este estudio, los experimentos *in vitro* se realizaron con el único fin de identificar los mecanismos de antagonismo presentes en los microorganismos, los experimentos de control biológico se realizaron *in vivo* para representar con más proximidad la realidad del patosistema Foc R1 - Gros Michel.

Bubici et al. (2019) señalan que los protocolos que se han utilizado en varios países para probar el efecto de los ACB contra Foc R4T han generado resultados diferentes y poco comparables, y que los próximos pasos son optimizar las tecnologías de bioformulación, consorcios microbianos y explotación de los metabolitos. A esta visión, se puede agregar la aplicación de microorganismos dirigida a un objetivo específico del desarrollo de la epidemia de Foc, como se realizó en esta investigación.

3.2. Ensayos de control biológico

En el experimento de plantas inoculadas con Foc R1 se observaron diferentes niveles de daño entre los tratamientos aplicados (Tabla 4). Cuando los ACB con diferentes modos de antagonismo se aplicaron después de la inoculación de Foc, sólo los microorganismos que exhibieron antibiosis (T3) y fortalecimiento de la planta (T4) generaron diferencias en el tiempo e intensidad de expresión de síntomas. Cuando los microorganismos se aplicaron antes de la inoculación de Foc, los microorganismos que mostraron competencia (T5) y fortalecimiento vegetal (T8) generaron retraso en la aparición de síntomas y reducción en la intensidad de síntomas de la enfermedad. El ACB que induce fortalecimiento vegetal fue útil para retrasar la expresión de síntomas de infección del patógeno, independientemente de si se aplicó antes o después de la inoculación del patógeno.

El análisis del efecto de los tratamientos se realizó con el período de incubación y el porcentaje de colonización vascular, ya que fueron las variables con mayor rango de respuesta y quizás son las más relevantes en el estudio de las epidemias de Foc. En estas condiciones experimentales la incidencia no fue una variable informativa porque se determinó a partir de síntomas externos según una escala visual, pero al momento de cortar las plantas para medir la colonización vascular se observó que no hay correspondencia entre los síntomas internos y externos.

La menor severidad de enfermedad (evaluada exclusivamente con área foliar clorótica) se obtuvo con la aplicación de ACB que inducen el crecimiento vegetal, pero el mayor efecto se obtuvo cuando el ACB se aplica antes de la inoculación con el patógeno. Este resultado se ajusta favorablemente a un escenario de prevención, en el que la aplicación de ACB reduce la probabilidad de que el patógeno infecte a la planta y quizás se establezca en el suelo (Hernández-Melchor et al., 2023). Por otro lado, el efecto de los ACB que exhiben antibiosis, competencia y depredación no es diferente entre plantas antes y después de la inoculación cuando se analiza la

severidad de infección de *F. oxysporum*.

Tabla 4. Período de incubación, incidencia, severidad y colonización vascular de Foc R1 en banano Gros Michel bajo nueve tratamientos.

Table 4. Incubation period, incidence, severity and vascular colonization of Foc R1 on Gros Michel banana under nine treatments.

No.	Tratamiento	Período de incubación	Incidencia (%)	Severidad (%)	Colonización vascular (%)
1	A1 (Ta) - C	40 ± 2.1 d	100 ± 0.0 c	70 ± 4.5 c	100 ± 5.0 c
2	A2 (Th) - D	40 ± 2.4 d	100 ± 0.0 c	50 ± 5.0 b	70 ± 4.2 b
3	A3 (Bs) - A	60 ± 1.8 b	100 ± 0.0 c	70 ± 4.0 c	70 ± 4.8 b
4	A4 (B) - F	55 ± 2.0 b	80 ± 5.2 b	50 ± 4.8 b	90 ± 4.3 bc
5	B1 (Ta) - C	50 ± 2.2 c	80 ± 4.7 b	50 ± 3.9 b	70 ± 4.9 b
6	B2 (Th) - D	45 ± 2.5 c	60 ± 6.0 a	70 ± 5.1 c	70 ± 5.0 b
7	B3 (Bs) - A	40 ± 2.0 d	100 ± 0.0 c	70 ± 4.3 c	90 ± 4.1 bc
8	B4 (B) - F	65 ± 1.9 a	60 ± 6.1 a	30 ± 3.5 a	50 ± 3.7 a
9	Control	40 ± 2.0 d	100 ± 0.0 c	70 ± 4.7 c	100 ± 4.5 c

El modo de competencia que exhibió *Trichoderma asperellum* en condiciones controladas no fue útil para reducir el nivel de colonización vascular o retrasar la infección de Foc R1 cuando se aplicó en plantas inoculadas (teóricamente después de que la infección tuvo lugar). En cambio, cuando se aplicó en plantas sanas (previo a la infección de Foc R1), la colonización vascular fue menor en 30% y la aparición de síntomas se retrasó un 20%. La diferencia observada entre plantas sanas y enfermas posiblemente se debe a la capacidad del antagonista de ocupar los sitios de infección radicular, además del consumo de carbohidratos clásico en los ACB (Castillo et al., 2019; Mon et al., 2021).

La depredación o micoparasitismo es un fenómeno poco estudiado, por su complejidad en las interacciones patógeno-antagonista y planta-patógeno. En este estudio, la aplicación de *Trichoderma harzianum*, identificada con el modo de antagonismo de depredación, no generó diferencias en el tiempo de infección ni en el nivel de colonización vascular. La metodología que se utilizó para identificar el modo de acción de depredación no permite discernir si se trató de micoparasitismo o producción de enzimas líticas, o posiblemente, el comportamiento *in vitro* del antagonista no se replica en condiciones naturales en campo (Rajeswari, 2019). Otros estudios han encontrado que la supresión de Foc R4T es el resultado de intercalado de cultivos que permiten el incremento de protistas predadores de hongos filamentosos como Foc (Ren et al., 2024). En estudios específicos con especies del género *Trichoderma* que tienen mecanismo de micoparasitismo (un tipo de depredación) se ha encontrado eficacia de control de Foc R1 entre 50 y 60% (Chaves et al., 2016; Vijayasanthi et al., 2022).

Las especies del género *Bacillus* son frecuentemente estudiadas por su capacidad antibiótica, la cepa de *Bacillus subtilis* que se aplicó en este estudio retrasó en 30% la aparición de síntomas y redujo el nivel de colonización vascular en 30% cuando se aplicó en plantas infectadas, pero sin síntomas externos (inicio de infección). Cuando se aplicó en plantas sanas previo a la inoculación de Foc R1, no se observaron diferencias con las plantas control. Los resultados observados de control con bacterias que producen metabolitos secundarios son similares a los observados en otros patosistemas y con otras cepas de Foc R4T (Dadrasnia et al., 2020; Yadav et al., 2021). El uso del género *Bacillus* es quizás el que mayor eficacia de control de Foc R1 ha logrado, se ha reportado eficacia de 100 en ensayos con la variedad Prata (Vieira et al., 2020) y 75% en Gros Michel (Izquierdo-García et al., 2024).

Junto a la antibiosis, el fortalecimiento de la planta es el fenómeno más estudiado en los ACB, y es más frecuente en hongos; los estudios genéticos y de biosíntesis no permiten diferenciar si los metabolitos secundarios producidos por los hongos o bacterias endófitos tienen más efecto en el patógeno o en la planta huésped (Nandhini et al., 2020). En las plantas a las que se aplicó *Bacillus* sp. se retrasó el tiempo de aparición de síntomas en 60% y el porcentaje de colonización vascular se redujo a la mitad en plantas inoculadas después de la aplicación del antagonista (Figura 1). En este experimento no fue posible diferenciar si el mecanismo por el que opera el antagonista es inducción de resistencia sistémica o estimulación de crecimiento, pero a la luz de estos resultados es notorio que las diferencias de infección son atribuibles al efecto del patógeno.



Figura 1. Plantas de banano inoculadas con Foc R1 y tratadas con antagonistas. De izquierda a derecha: fortalecimiento vegetal, competencia, depredación, antibiosis y control.

Figure 1. Banana plants inoculated with Foc R1 and treated with antagonists. From left to right: plant strengthening, competition, predation, antibiosis, and control (without treatment).

4. Conclusiones

Se identificaron y evaluaron microorganismos con distintos modos de antagonismo (competencia, antibiosis, depredación y fortalecimiento de la planta). Los resultados destacan que los microorganismos con efectos específicos en el control de Foc R1 mostraron eficacia variable dependiendo de si se aplicaron antes o después de la infección del patógeno. El fortalecimiento de la planta y la antibiosis destacaron como mecanismos efectivos para retrasar la aparición de síntomas y reducir la colonización vascular en plantas infectadas.

Bacillus subtilis y *Bacillus* sp. redujeron significativamente la colonización vascular y retrasaron la aparición de síntomas cuando se aplicaron en plantas infectadas, mostrando la eficacia de la antibiosis. Por otro lado, *Trichoderma asperellum* y *Trichoderma harzianum* evidenciaron que el contexto de aplicación (previo o posterior a la infección) es crucial para su efectividad, siendo la competencia más efectiva en plantas sanas. Estos hallazgos refuerzan la importancia de direccionar la aplicación de antagonistas según el estadio de infección del patógeno, la fase de crecimiento vegetal y la condición epidemiológica.

La respuesta observada a los microorganismos representa una observación puntual, para discernir con claridad el comportamiento de otros antagonistas como agentes de control biológico se deben profundizar los mecanismos de antagonismo y replicar los ensayos en plantas en campo.

Agradecimientos

Queremos agradecer a los investigadores de AGROSAVIA por compartir protocolos y comunicación necesaria para ejecutar las actividades de la investigación.

Financiamiento

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto ATN/RF-18761-RG, Fortalecimiento de capacidades para la prevención y el manejo de la marchitez por Fusarium de las Musáceas en América Latina y el Caribe, que contó con el apoyo financiero del Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria [FONTAGRO] el Banco Interamericano de Desarrollo [BID].

Contribuciones de los autores

- Miguel Hoyos: conceptualización, investigación, metodología, redacción – revisión y edición.
- Pedro Terrero: administración del proyecto, supervisión.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Avis, T. J., Gravel, V., Antoun, H., y Tweddell, R. J. (2008). Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1733–1740. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.013>
- Bubici, G., Kaushal, M., Priggallo, M. I., Gómez-Lama Cabanás, C., y Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 10, 616 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
- Castillo, A., Puig, C., y Cumagun, C. (2019). Non-synergistic effect of *Trichoderma harzianum* and *Glomus* spp. in reducing infection of Fusarium wilt in banana. *Pathogens*, 8(2), 43. <https://doi.org/10.3390/pathogens8020043>
- Chaves, N. P., Staver, C., & Dita, M. A. (2016). Potential of *Trichoderma asperellum* for biocontrol of Fusarium wilt in banana. *Acta Horticulturae*, 1114, 261–266. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1114.35>
- Dadrasnia, A., Usman, M. M., Omar, R., Ismail, S., y Abdullah, R. (2020). Potential use of *Bacillus* genus to control of bananas diseases: Approaches toward high yield production and sustainable management. *Journal of King Saud University - Science*, 32(4), 2336–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.011>
- Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A. M., Brewer, T. E., Benavent-González, A., Eldridge, D. J., Bardgett, R. D., Maestre, F. T., Singh, B. K., y Fierer, N. (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325. <https://doi.org/10.1126/science.aap9516>
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E. S. G., y Staver, C. P. (2018). Fusarium wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Drenth, A., y Kema, G. (2021). The vulnerability of bananas to globally emerging disease threats. *Phytopathology*, 111(12), 2146–2161. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-20-0311-RVW>
- García-Bastidas, F. A., van der Veen, A. J. T., Nakasato-Tagami, G., Meijer, H. J. G., Arango-Isaza, R. E., y Kema, G. H. J. (2019). An improved phenotyping protocol for panama disease in banana. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1006. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01006>
- García-Bastidas, F. (2022). *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* tropical race 4 (Foc TR4). *CABI Compendium*, 59074053. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.59074053>
- García-Bastidas, F., Drenth, A., y Kema, G. H. J. (2024). The past, present and future of Fusarium wilt of banana caused by Tropical Race 4. En A. Drenth y G. H. J. Kema (eds.), *Achieving sustainable cultivation of bananas Volume 3: Diseases and Pests* (pp. 113–144). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0108.05>
- Ghanbarzadeh, B., Safaie, N., y Goltepah, E. M. (2014). Antagonistic activity and hyphal interactions of *Trichoderma* spp. against *Fusarium proliferatum* and *F. oxysporum* *in vitro*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 47(16), 1979–1987. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.864506>
- Gomes, E. N., Elsherbiny, E. A., Aleem, B., y Bennett, J. W. (2020). Beyond classical biocontrol: new perspectives on *Trichoderma*. En A. E.-L.Hesham, R. S. Upadhyay, G. D.Sharma, C. Manoharachary, y V. K. Gupta (eds.), *Fungal Biotechnology and Bioengineering. Fungal Biology* (pp. 437–455). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41870-0_19
- Guzmán-Guzmán, P., Porras-Troncoso, M. D., Olmedo-Monfil, V., y Herrera-Estrella, A. (2019). *Trichoder-*

- ma Species: Versatile plant symbionts. *Phytopathology*, 109(1), 6–16. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0218-RVW>
- Hernández-Melchor, D. J., Guerrero-Chávez, A. C., Ferrera-Rodríguez, M. R., Ferrera-Cerrato, R., Larsen, J., y Alarcón, A. (2023). Cellulase and chitinase activities and antagonism against *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* race 1 of six *Trichoderma* strains isolated from Mexican maize cropping. *Biotechnology Letters*, 45(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03343-x>
- Huang, J., Pang, Y., Zhang, F., Huang, Q., Zhang, M., Tang, S., Fu, H., y Li, P. (2019). Suppression of *Fusarium* wilt of banana by combining acid soil ameliorant with biofertilizer made from *Bacillus velezensis* H-6. *European Journal of Plant Pathology*, 154(3), 585–596. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01683-5>
- Izquierdo-García, L. F., Carmona-Gutiérrez, S. L., Moreno-Velandia, C. A., Villarreal-Navarrete, A. del P., Burbano-David, D. M., Quiroga-Mateus, R. Y., Gómez-Marroquín, M. R., Rodríguez-Yzquierdo, G. A., y Betancourt-Vásquez, M. (2024). Microbial-based biofungicides mitigate the damage caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 and improve the physiological performance in banana. *Journal of Fungi*, 10(6), 419. <https://doi.org/10.3390/jof10060419>
- Keswani, C., Mishra, S., Sarma, B. K., Singh, S. P., y Singh, H. B. (2014). Unraveling the efficient applications of secondary metabolites of various *Trichoderma* spp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(2), 533–544. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5344-5>
- Mayorga Morejón, K. R., Solis Hidalgo, Z. K., Terrero Yepez, P. I., y Hoyos Montesdeoca, M. A. (2024). Interacciones antagónicas entre *Trichoderma* spp. y *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* R1: Un estudio *in vitro* sobre competencia y antibiosis. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 8(54), 12–23. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol8iss54.2024pp12-23>
- Mon, Y. Y., Bidabadi, S. S., Oo, K. S., y Zheng, S.-J. (2021). The antagonistic mechanism of rhizosphere microbes and endophytes on the interaction between banana and *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 116, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2021.101733>
- Munhoz, T., Vargas, J., Teixeira, L., Staver, C., y Dita, M. (2024). *Fusarium* Tropical Race 4 in Latin America and the Caribbean: status and global research advances towards disease management. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1397617 <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397617>
- Nandhini, M., Udayashankar, A. C., Jogaiah, S., y Prakash, H. S. (2020). Unraveling the Potentials of Endophytes and Its Applications. En A. E.-L.Hesham, R. S. Upadhyay, G. D.Sharma, C. Manoharachary, y V. K. Gupta (eds.), *Fungal Biotechnology and Bioengineering. Fungal Biology* (pp. 331–348). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41870-0_14
- Nel, B., Steinberg, C., Labuschagne, N., y Viljoen, A. (2006). The potential of nonpathogenic *Fusarium oxysporum* and other biological control organisms for suppressing *Fusarium* wilt of banana. *Plant Pathology*, 55(2), 217–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01344.x>
- Parlevliet, J. E. (1993). What is Durable resistance, A general outline. En Th. Jacobs, y J. E. Parlevliet (eds.), *Durability of disease resistance* (pp. 23–39). Springer Netherland. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2004-3_3
- Rajeswari, P. (2019). Combination of *Trichoderma viride* and *Pseudomonas fluorescens* for the enhanced control of *Fusarium* wilt disease caused by *Fusarium oxysporum* infecting *Arachis hypogaea* L. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(1), 138–143. <https://doi.org/10.31018/jans.v11i1.1985>
- Rashad, Y. M., y Abdel-Azeem, A. M. (2020). Recent progress on *Trichoderma* secondary metabolites. En A. E.-L.Hesham, R. S. Upadhyay, G. D.Sharma, C. Manoharachary, y V. K. Gupta (eds.), *Fungal Biotechnology and Bioengineering. Fungal Biology* (pp. 281–303). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41870-0_12
- Ren, X., Zhou, Z., Liu, M., Shen, Z., Wang, B., Jousset, A., Geisen, S., Ravanbakhsh, M., Kowalchuk, G. A., Li, R., Shen, Q., y Xiong, W. (2024). Intercropping with *Trifolium repens* contributes disease suppression of banana *Fusarium* wilt by reshaping soil protistan communities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 361, 108797. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108797>
- Román Jeri, C. H. (2012). *Consideraciones epidemiológicas para el manejo de la marchitez por Fusarium (Fusarium oxysporum f. sp. cubense) del banano en la región central del Perú*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/926>
- Shen, Z., Xue, C., Penton, C. R., Thomashow, L. S., Zhang, N., Wang, B., Ruan, Y., Li, R., y Shen, Q. (2019). Suppression of banana Panama disease induced by soil microbiome reconstruction through an

- integrated agricultural strategy. *Soil Biology and Biochemistry*, 128, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.10.016>
- Solórzano, R., Ramírez Maguiña, H. A., Johnson, L., Ureta Sierra, C., y Cruz, J. (2025). Current progress in microbial biocontrol of banana Fusarium wilt: A systematic review. *Agronomy*, 15(3), 619. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030619>
- Vieira, L. C. S., Costa, S. N., Borges, C. V., Gonçalves, Z. S., y Haddad, F. (2020). *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* biocontrol mediated by *Bacillus* spp. in Prata-Anã banana. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 15(3), 1–7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i3a8030>
- Vijayasanthi, S., Akila, R., Ayyandurai, M., y Kannan, R. (2022). Survey, identification and management of Fusarium wilt of banana in Tamirabarani tract of Southern districts of Tamil Nadu. *Journal of Biological Control*, 36(1), 64–70. <https://doi.org/10.18311/jbc/2022/30449>
- Villavicencio-Vásquez, M., Espinoza-Lozano, F., Espinoza-Lozano, L., y Coronel-León, J. (2025). Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1578915. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915>
- Viljoen, A., Mostert, D., Chiconela, T., Beukes, I., Fraser, C., Dwyer, J., Murray, H., Amisse, J., Matabuana, E. L., Tazan, G., Amugoli, O. M., Mondjana, A., Vaz, A., Pretorius, A., Bothma, S., Rose, L. J., Beed, F., Dusunceli, F., Chao, C.-P., y Molina, A. (2020). Occurrence and spread of the banana fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* TR4 in Mozambique. *South African Journal of Science*, 116(11/12), 8608. <https://doi.org/10.17159/sajs.2020/8608>
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Barbetti, M. J., Li, H., Woo, S. L., y Lorito, M. (2008). A novel role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 72(1–3), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2008.05.005>
- Vinale, F., y Sivasithamparam, K. (2020). Beneficial effects of *Trichoderma* secondary metabolites on crops. *Phytotherapy Research*, 34(11), 2835–2842. <https://doi.org/10.1002/ptr.6728>
- Watanabe, T. (2002). *Pictorial atlas of soil and seed fungi*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040821>
- Yadav, K., Damodaran, T., Dutt, K., Singh, A., Muthukumar, M., Rajan, S., Gopal, R., y Sharma, P. C. (2021). Effective biocontrol of banana Fusarium wilt tropical race 4 by a *Bacillus* rhizobacteria strain with antagonistic secondary metabolites. *Rhizosphere*, 18, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100341>
- Zadoks, J. C. (1993). The partial past: Comments on the history of thinking about resistance of plants against insects, nematodes, fungi, and other harmful agents. En Th. Jacobs, y J. E. Parlevliet (eds.), *Durability of disease resistance* (pp. 11–22). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2004-3_2
- Zheng, S.-J., Hu, H., Li, Y., Chen, J., Li, X., y Bai, T. (2024). Editorial: Microbial interaction with banana: mechanisms, symbiosis, and integrated diseases control. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1390969. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1390969>