

Efecto de *Trichoderma harzianum* en la supresión de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William

Efecto de *Trichoderma harzianum* en la supresión de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William

Mauro Danilo Palacios Moran , Juan Bautista Troncozo Correa , Víctor Jorge García Gallirgos , Willington Paul Alcívar Macías

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

Autor de correspondencia: juan.troncozo2017@uteq.edu.ec

Recibido: 16/10/2025. Aceptado: 10/06/2026.

Publicado el 3 de julio de 2026.

Resumen

Los nematodos constituyen uno de los principales agentes fitoparásitos responsables de las mayores pérdidas en las plantaciones de musáceas. El género *Trichoderma* se ha propuesto como una alternativa biológica para el control de organismos patógenos. La presente investigación se desarrolló en las instalaciones del Campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, con el objetivo de evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum* sobre la población de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano variedad Gran William. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones: T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}), T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}), T5 (control químico con nematicida) y T6 (control sin aplicación). Los resultados demostraron que los tratamientos con *T. harzianum* en las mayores concentraciones (T3 y T4), así como el control químico (T5), fueron efectivos en la disminución de la tasa neta reproductiva. Además, se observó un efecto significativo sobre variables morfológicas, longitud y el peso total de las raíces. El tratamiento químico (T5) presentó la mayor eficacia en la reducción de raíces no funcionales y en la disminución de *Pratylenchus* spp., seguido del tratamiento con *T. harzianum* a la concentración 1×10^{10} conidios mL^{-1} (T4). Se evidenció el potencial de *T. harzianum* como una alternativa biológica eficaz al uso de nematicidas químicos, contribuyendo a un manejo de los nematodos en el cultivo de banano.

Palabras clave: nematodos, conidia, biological control, mycoparasite.

Abstract

Nematodes are one of the main plant parasitic agents responsible for the greatest losses in banana plantations. The *Trichoderma* genus has been proposed as a biological alternative for controlling pathogenic organisms. This research was conducted at the “La María” Campus of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo. The objective was to evaluate the effect of *Trichoderma harzianum* on the *Pratylenchus* spp. population in banana Gran William variety. A completely randomized design (CRD) was used with six treatments and three replications: T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidia mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidia mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidia mL^{-1}), T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidia mL^{-1}), T5 (chemical control with nematicide) and T6 (control without application). The results demonstrated that treatments with *T. harzianum* at the highest concentrations (T3 and T4), as well as chemical control (T5), were effective in reducing nematode decreasing the net reproductive rate. In addition, a significant effect was observed on morphological variables root length and total weight. Chemical treatment (T5) was most effective in reducing nonfunctional roots and decreasing *Pratylenchus* spp., followed by treatment with *T. harzianum* at a concentration of 1×10^{10} conidia mL^{-1} (T4). This demonstrated the potential of *T. harzianum* as an effective biological alternative to chemical nematicides, contributing to nematode management in banana crops.

Keywords: nematodes, conidia, biological control, mycoparasite.

Introducción

El banano (*Musa paradisiaca* L.) constituye uno de los cultivos tropicales de mayor relevancia económica y social a nivel mundial, al ser una fuente fundamental de alimento, empleo e ingresos para millones de personas (Beteta Alvarado *et al.*, 2022). La producción mundial de banano supera los 120 millones de toneladas anuales, siendo cultivado en más de 130 países de las regiones tropicales y subtropicales (Subash y Perumalsamy, 2024).

En Ecuador, el cultivo de banano representa un pilar esencial de la economía nacional y del desarrollo agrícola (Soto-Valenzuela *et al.*, 2024). La producción nacional supera los 7 millones de toneladas anuales, generando empleo directo e indirecto a más de 2 millones de personas (Piedra-Bonilla y Echeverría, 2024).

No obstante, la sostenibilidad de este cultivo enfrenta serias amenazas fitosanitarias, entre ellas la infestación por nematodos fitoparásitos (Cuzco Jiménez *et al.*, 2021). Dentro de las especies más dañinas que afectan al cultivo se encuentra *Pratylenchus*, un nematodo migratorio endoparásito ampliamente distribuido en los sistemas bananeros tropicales (Nomura *et al.*, 2024). Este patógeno penetra las raíces, donde se alimenta del contenido celular y provoca lesiones necróticas que coalescen y limitan el flujo de savia (Castillo Castillo *et al.*, 2025). *Pratylenchus* se caracteriza por su rápida reproducción, su adaptabilidad a diversos tipos de suelo y su capacidad de sobrevivir en residuos vegetales (Castillo-Arévalo, 2022b).

Tradicionalmente, el control de nematodos en banano se ha basado en la aplicación de nematicidas químicos como el fenamifos, oxamil o carbofurano, los cuales, si bien ofrecen un efecto rápido, presentan serias limitaciones en términos ambientales y de salud humana (Sandoval-Ruiz *et al.*, 2022). Estos productos pueden generar contaminación del suelo, lixiviación hacia fuentes hídricas y acumulación de residuos tóxicos, afectando la biodiversidad del agroecosistema (Arboleda-Riascos *et al.*, 2022).

En este contexto, el género *Trichoderma* ha cobrado gran importancia como alternativa biológica en la protección de cultivos frente a diversos patógenos del suelo, incluidos los nematodos (López Martínez *et al.*, 2022). *Trichoderma* spp. son hongos filamentosos de vida libre, ampliamente distribuidos en suelos agrícolas y rizosferas, reconocidos por su capacidad antagonista, promotora del crecimiento vegetal y de biocontrol (González-León *et al.*, 2022). Actuando mediante diversos mecanismos como el micoparasitismo, la competencia por espacio y nutrientes, la producción de enzimas líticas (quitinasas, glucanasas y proteasas) y la liberación de metabolitos secundarios con efecto nematicida y antibiótico (Abdulla *et al.*, 2023).

Además, *Trichoderma* induce la resistencia sistémica en las plantas, fortaleciendo sus defensas naturales frente a ataques de organismos fitoparásitos (de Oliveira *et al.*,

2023). Ante lo expuesto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de *Trichoderma harzianum* sobre la población de *Pratylenchus* spp. en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.) variedad Gran William.

Materiales y métodos

Localización de la investigación

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Campus Universitario “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en el kilómetro 7,5 de la vía Quevedo-El Empalme, a una altitud de 67 m sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas del sitio fueron 01° 05' 02" de Latitud Sur y 79° 29' 54" de Longitud Oeste.

Diseño experimental

La investigación se estructuró en dos fases: una *in vitro* y otra *in vivo*. En ambas se evaluaron cuatro cepas de *Trichoderma harzianum* a diferentes concentraciones. Se establecieron seis tratamientos experimentales: cuatro con aplicaciones de *Trichoderma* spp. en concentraciones de 1x10⁴, 1x10⁶, 1x10⁸ y 1x10¹⁰ conidios mL⁻¹, un tratamiento con control químico mediante nematicida, y un tratamiento control sin aplicación. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones. Cada uno de los tratamientos *in vitro* se conformaron por doce cajas Petri y doce plántulas de banano, cultivadas bajo condiciones de invernadero para el ensayo *in vivo*.

Aislamiento e identificación morfológica de *Pratylenchus* spp.

El aislamiento de los nematodos del género *Pratylenchus* spp. se realizó siguiendo la metodología propuesta por de Souza Junior (2023). Se recolectaron cinco muestras de raíces de aproximadamente 100 g, tanto de la planta madre como del hijo, las cuales se sometieron a un proceso de tamizaje para la extracción de los nematodos. Posteriormente, el aislamiento se efectuó de acuerdo con la técnica descrita por de Castillo Castillo *et al.* (2025). Para ello, las raíces se licuaron (100 g) en 500 mL de agua y se dejaron en reposo durante 10 minutos. La suspensión obtenida se filtró a través de un juego de tamices superpuestos con aberturas de 500, 90 y 25 µm, respectivamente. Los restos retenidos en la criba de 90 µm se transfirieron al embudo de Baermann, utilizando papel toalla como filtro y 40 cc de agua destilada. Luego de un periodo de 24 a 48 horas, las formas móviles de los nematodos atravesaron el filtro y se recolectaron en un volumen de 5 a 10 mL de agua.

La identificación morfológica de *Pratylenchus* spp. se realizó mediante observación microscópica con aumentos de 10x y 40x, utilizando las claves taxonómicas propuestas por Bucki *et al.* (2020). La identificación se basó en características morfológicas de las hembras, como la región labial, el estilete, el sistema excretor, el intestino medio, los

órganos reproductivos y la presencia o ausencia de machos, los cuales son poco frecuentes en muchas especies del género. Se tomaron 30 μL de la suspensión para su observación en un portaobjetos.

Multiplicación de *Pratylenchus* spp. en discos de zanahoria

La multiplicación del nematodo se llevó a cabo empleando la técnica de discos de zanahoria descrita por Esteves *et al.* (2019). Se seleccionaron zanahorias frescas y sanas, de forma cilíndrica y aproximadamente 3 cm de diámetro, las cuales fueron peladas, lavadas con agua estéril y cortadas en discos de 3 a 5 mm de espesor. Los discos se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 10 % durante cinco minutos y luego se enjuagaron con agua estéril para eliminar residuos del desinfectante. Posteriormente, fueron flameados, asperjados con alcohol al 90 % y colocados en placas Petri que contenían 25 mL de agar noble al 2 %, suplementado con penicilina a una concentración de 400 mg/500 mL.

Los nematodos obtenidos del aislamiento fueron esterilizados con penicilina y ampicilina, mediante un proceso de centrifugación a 3.500 rpm durante 60 segundos, que se repitió tres veces para garantizar la eliminación de contaminantes. Una vez esterilizados, aproximadamente 50 nematodos en un volumen de 50 μL fueron inoculados en los discos de zanahoria, los cuales se incubaron a 28 °C durante 30 días para permitir su multiplicación. Posteriormente, se cuantificó la población de nematodos obtenida, considerando la relación entre el número de nematodos observados y el volumen de agua empleado en el proceso de extracción.

Cultivo y multiplicación de los aislamientos de *Trichoderma* spp.

Se cultivaron colonias puras de cuatro aislamientos de *Trichoderma* spp. en medio Papa Dextrosa Agar (PDA) al 100 %, ajustado con hidróxido de potasio al 85 %, según la metodología descrita por Abdulla *et al.* (2023). Los cultivos se incubaron a 24 °C durante dos semanas para promover el crecimiento micelial y la esporulación. Posteriormente, se extrajeron discos de 5 mm de diámetro que contenían micelio y estructuras reproductivas, los cuales se transfirieron a nuevas placas Petri con PDA al 100 % en condiciones asépticas para su multiplicación. Los aislamientos se mantuvieron a 24 °C durante dos semanas adicionales. A partir de los cultivos puros de *Trichoderma* spp., se preparó una suspensión de conidios mL^{-1} de acuerdo con el método descrito por Guo *et al.* (2022).

Inoculación *in vitro* de *Trichoderma* spp. contra *Pratylenchus* spp.

La evaluación *in vitro* se efectuó aplicando una suspensión de conidios mL^{-1} de *Trichoderma* spp. (10^2 conidios mL^{-1}) sobre la plataforma de reproducción basada en discos de zanahoria. En cada unidad experimental se enfrentaron los hongos con poblaciones de *Pratylenchus* spp., incluyendo huevos y juveniles (J2). En el caso de los huevos, se colocaron 10 μL

de una suspensión con 10 huevos esterilizados, mientras que para los juveniles se utilizaron 20 μL con 20 individuos. Las observaciones se realizaron cada 12 horas durante un periodo de 2 a 7 días. La viabilidad de los nematodos se determinó observando su movilidad. Se consideró como nematodo muerto aquel que no presentaba movimiento y no recuperaba movilidad ante estímulos mecánicos realizados con una fibra de brocha.

Preparación del suelo y establecimiento del experimento *in vivo*

Para el ensayo *in vivo* se utilizó una mezcla de suelo franco arcilloso y turba negra en una proporción 2,1. El sustrato fue esterilizado mediante solarización durante dos semanas, empleando polímeros plásticos negros para evitar la proliferación de microorganismos contaminantes. Posteriormente, se llenaron fundas plásticas de 12 $\times$ 16 pulgadas con el sustrato solarizado, donde se trasplantaron plántulas meristemáticas de banano variedad Gran William de aproximadamente 10 cm de altura, bajo condiciones controladas de invernadero.

La primera aplicación del biocontrolador se realizó al momento del trasplante. Posteriormente, se realizaron aplicaciones adicionales a los 8, 15, 22, 35 y 45 días después del trasplante (ddt). Las inoculaciones de aproximadamente 12.000 individuos de *Pratylenchus* spp. se realizaron treinta días después del trasplante. La inoculación se realizó mediante perforaciones alrededor del sistema radicular, aplicando la suspensión con una micropipeta.

El tratamiento químico se aplicó a los 45 días después del trasplante, utilizando un nematicida comercial (Fluopyram) en la dosis recomendada por el fabricante. Todas las plántulas recibieron una fertilización básica de 5 g por plántula de un fertilizante completo NPK (10-30-10) a los 20, 30 y 40 días después de la inoculación de *Trichoderma* spp. Los riegos se realizaron dos veces por semana. Durante el periodo experimental se retiraron las hojas senescentes de las plántulas para mantener un estado fitosanitario óptimo.

Variables evaluadas

Determinación de la eclosión de huevos de nemátodos (*in vitro*)

Los huevos de *Pratylenchus* spp. fueron extraídos a partir de raíces infestadas mediante lavado y tamizado, seguido de su purificación en agua destilada estéril. Posteriormente, se cuantificaron utilizando una cámara de conteo y se ajustó la suspensión a una concentración uniforme de 100 huevos por unidad de volumen. Para cada tratamiento, se colocó un volumen determinado de la suspensión de huevos en placas de Petri, a las cuales se añadió la suspensión de conidios de *T. harzianum* a diferentes concentraciones. Las unidades experimentales se incubaron en condiciones controladas de temperatura (25 ± 2 °C). La eclosión de los huevos se evaluó a intervalos de 48 horas mediante observación directa

en microscopio estereoscópico, contabilizando el número de juveniles eclosionados y huevos no eclosionados. El porcentaje de inhibición de la eclosión se calculó en relación con el control, utilizando la proporción de huevos que no lograron eclosionar en cada tratamiento.

Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

Se evaluó mediante la observación directa bajo microscopio, registrando el número de nematodos vivos a las 48 horas posteriores a la aplicación del antagonista. Para cuantificar el grado de inhibición se empleó una escala semicuantitativa, donde: 1 = todos los nematodos vivos; 2 = 25 % muertos; 3 = 50 % muertos; 4 = 75 % muertos; 5 = 100 % muertos.

Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Se determinó el número de individuos presentes en las placas Petri luego de 48 horas de exposición al antagonista, registrando el porcentaje de nematodos que lograron reproducirse en comparación con el número inicial.

Longitud de raíces (cm)

La longitud radicular se midió desde la base del tallo hasta el extremo de la raíz más larga, utilizando una regla milimetrada al final de la evaluación.

Peso total de raíces por planta (g)

Las raíces de cada plántula se lavaron cuidadosamente para eliminar los residuos de suelo y se registró el peso fresco total (raíces funcionales y dañadas) mediante el uso de una balanza analítica (Ohaus). La medición se efectuó a los 90 días después de la siembra (ddt).

Porcentaje de raíces funcionales

Se consideraron raíces funcionales aquellas que no presentaron daño o necrosis avanzada. El porcentaje de raíces funcionales

se determinó aplicando la siguiente fórmula (ver Ecuación 1):

$$\% \text{ de raíces funcionales} = \frac{\text{número de raíces funcionales}}{\text{número de raíces totales}} \times 100 \quad (1)$$

Tratamiento de los datos

Se verificó los supuestos del análisis de varianza. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se verificó con la prueba de Levene. Una vez comprobados los supuestos, se procedió a realizar un Análisis de Varianza (ANOVA). En los casos en que el ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey al 95 % de probabilidad. La tabulación de los datos se efectuó en Microsoft Excel, mientras que el análisis estadístico en InfoStat, versión estudiantil 2021.

Resultados

Inhibición de eclosión de huevos (*in vitro*)

En la variable de inhibición de la eclosión de huevos (*in vitro*), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos donde el T5 (Control químico (nematicida)) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) inhibieron la eclosión de los huevos de *Pratylenchus* con (74 y 70 %) respectivamente. A medida que se disminuye la carga de los conidios de *Trichoderma* spp. la actividad antagonista se ve reducida, donde el tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) con 39 %, el tratamiento T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) y T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) ambas con 20 %, en comparación al T6 (Control) que no presentó inhibición eclosión de huevos de nematodos (Figura 1).

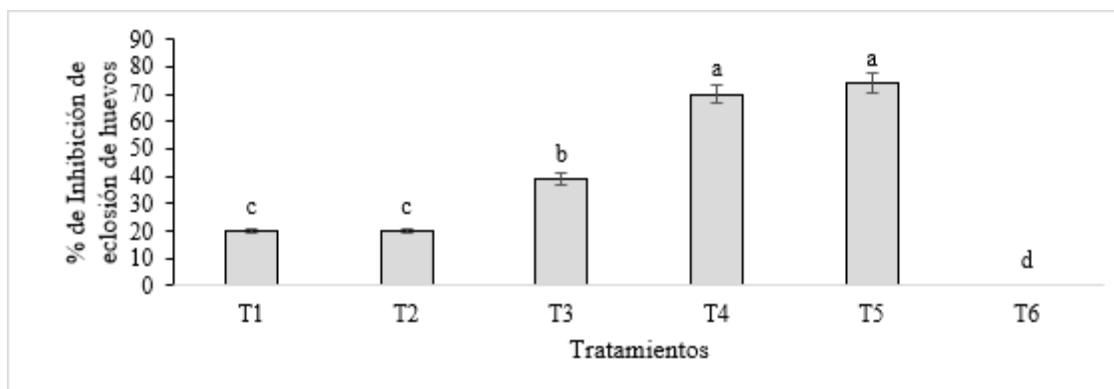


Figura 1. Inhibición de eclosión de huevos de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

En la variable de número de nematodos muertos (*in vitro*), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. La aplicación de T5 (Control químico (nematicida)) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) ocasionaron la muerte de mayor del (90 y 87 %) respectivamente. La aplicación del tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) con 70 % de nematodos muertos de estados juveniles (J2). A diferencia del tratamiento T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) y T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) con la disminución de las conidios reduce su efectividad antagonista con 50 %, en comparación al T6 (Control) que presentó 5 % de mortalidad (Figura 2).

Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

En la variable de tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*) en el experimento (*in vitro*), se mostraron diferencias significativas entre tratamientos. La aplicación de T5 (Control químico y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) ocasionaron la menor tasa de reproductividad (10 y 20 %) respectivamente. La aplicación de tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}) y T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}) que tuvieron tasas reproductivas mayores (43, 44 y 48 %) respectivamente, en comparación al T6 (Control) que presentó 90 % de reproductividad (Figura 3).

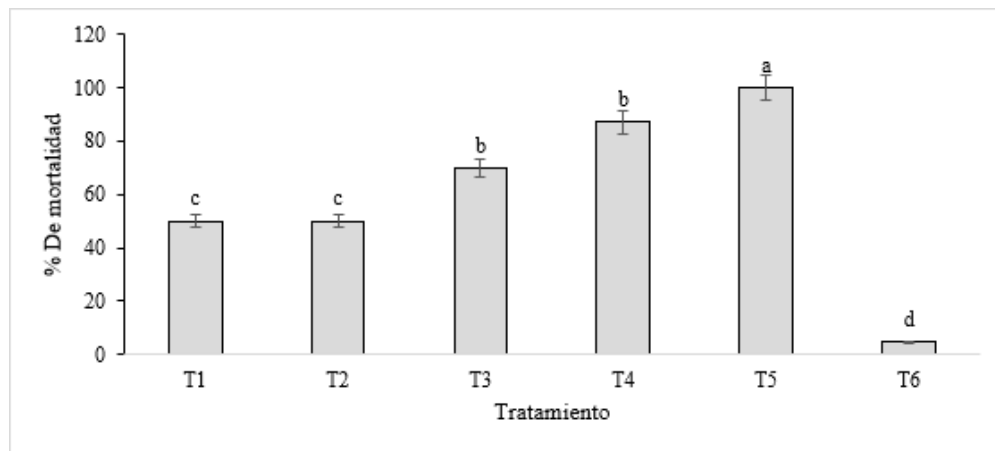


Figura 2. Porcentaje de nematodos muertos (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

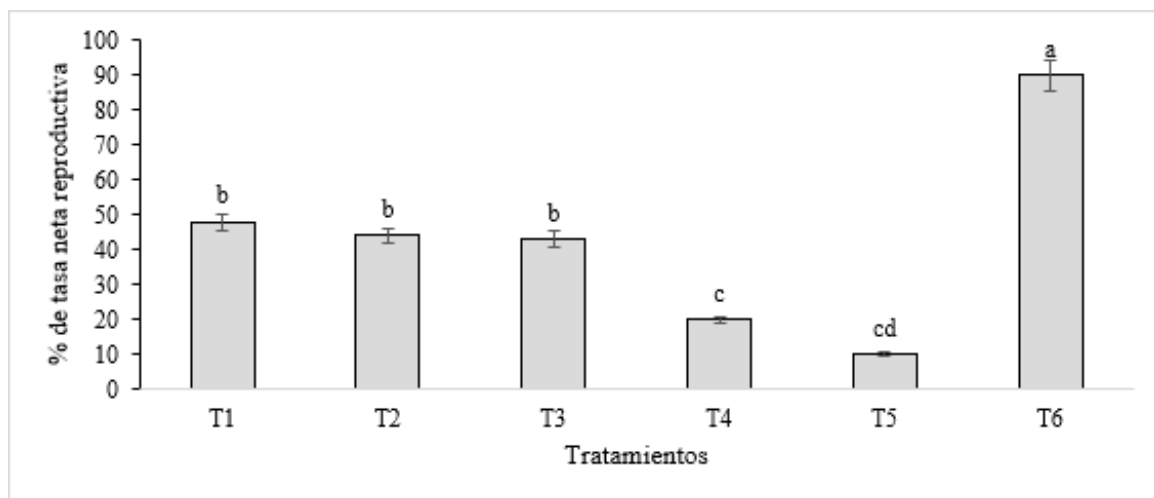


Figura 3. Tasa neta reproductiva de *Pratylenchus* spp. (*in vitro*)

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Longitud de raíces (cm)

La aplicación de *Trichoderma harzianum* influyó significativamente en la longitud del sistema radicular de las plántulas de banano. Los tratamientos T5 (control químico) y T4 (*T. harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) registraron las mayores longitudes de raíz, con valores de 74,48 y 73,38 cm, respectivamente, siendo estadísticamente superiores al resto de los tratamientos. Por su parte, T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) y T6 (control) presentaron longitudes radiculares de 65,44; 64,66; 63,54 y 65,66 cm, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 4).

Peso total de raíces por plántulas

En el peso total de raíces por plántula se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento T4 (*Trichoderma harzianum* 1×10^{10} conidios mL^{-1}) presentó el mayor peso radicular, con un valor de 195,13 g, siendo estadísticamente superior al resto de los tratamientos evaluados. En contraste, el tratamiento T3 (*T. harzianum* 1×10^8 conidios mL^{-1}) registró el menor peso de raíces, con 117,73 g, mostrando diferencias significativas respecto a T4. Por otro lado, los tratamientos T1 (*T. harzianum* 1×10^4 conidios mL^{-1}), T2 (*T. harzianum* 1×10^6 conidios mL^{-1}), T5 (control químico) y T6 (control) presentaron pesos radiculares de 136,00; 147,26; 165,33 y 131,46 g, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 5).

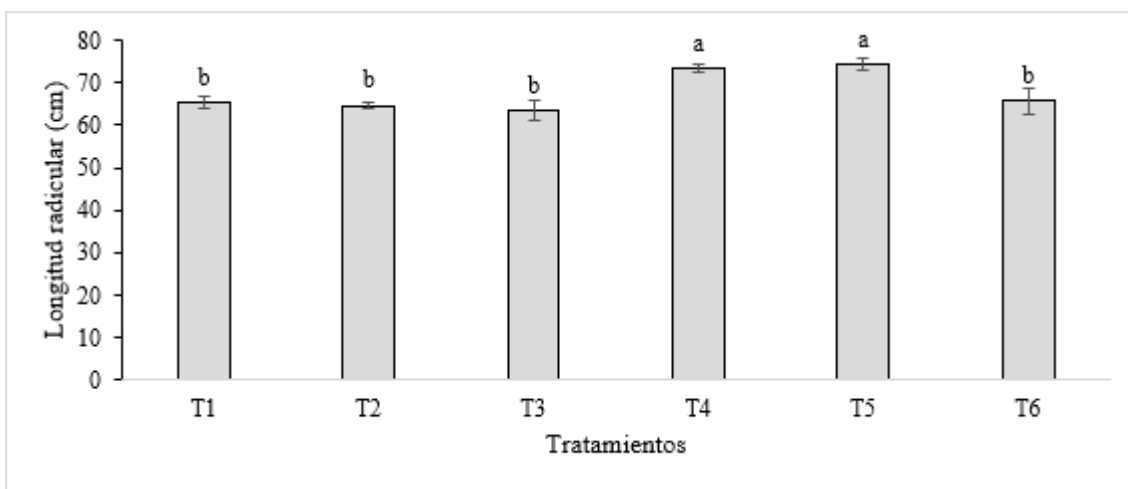


Figura 4. Longitud radicular de las plántulas de banano después de la aplicación de los tratamientos.

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

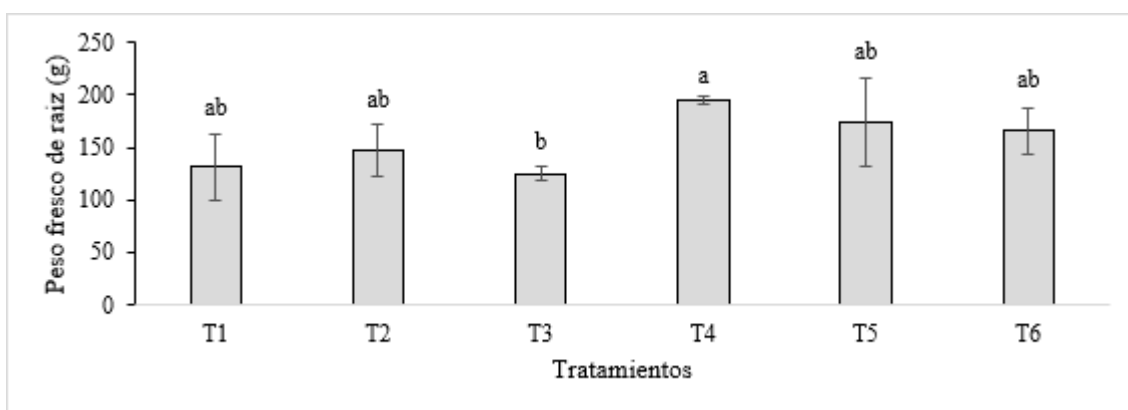


Figura 5. Peso total de raíz de la plántula de banano después de la aplicación de los tratamientos.

Nota. Las barras expresan la media y las líneas verticales sobre la media muestran la desviación estándar. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Porcentaje de raíces funcionales

En las variables raíces funcionales por plántula, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Bajo las condiciones del estudio, la aplicación de *T. harzianum* no generó un efecto sobre la funcionalidad radicular del cultivo de banano.

Discusión

Los resultados obtenidos demostraron que las concentraciones más elevadas de *T. harzianum*, particularmente el tratamiento T4 (1×10^{10} conidios mL^{-1}), ejercieron un efecto significativo en la inhibición de la eclosión de los huevos de *Pratylenchus* spp. La inhibición puede atribuirse a la liberación de metabolitos secundarios y enzimas extracelulares como quitinasas, proteasas y glucanasas, las cuales degradan las cubiertas de los huevos o interfieren en el desarrollo embrionario del nematodo (Nafady *et al.*, 2022). De acuerdo con lo descrito por Singh *et al.* (2023), *T. harzianum* produce compuestos volátiles (6-pentyl- α -pirona, peptaiboles y harzianolidas) que afectan directamente la viabilidad de los huevos de nematodos. Resultados similares fueron reportados por d'Errico *et al.* (2022), quienes observaron una reducción del 68 % en la eclosión de huevos de *Meloidogyne incognita* tras la aplicación de *T. harzianum*.

En la variable número de nematodos muertos (*in vitro*), los tratamientos T4 y T5 mostraron alta mortalidad. La letalidad inducida por *T. harzianum* podría explicarse por su capacidad para parasitar directamente los estadios juveniles del nematodo (J2), adhiriéndose a la cutícula y penetrándola mediante la acción combinada de enzimas líticas y presión mecánica del micelio (Ahmad *et al.*, 2022). Este tipo de interacción micoparasítica ha sido ampliamente documentado por e Silva *et al.* (2022), quienes demostraron que *T. harzianum* causa deformaciones y colapso en la estructura cuticular de *M. javanica*.

En cuanto a la tasa neta reproductiva (*in vitro*), se observó una reducción en los tratamientos T4 y T5, frente al control sin aplicación. Este efecto sugiere una interferencia directa de *T. harzianum* en los procesos reproductivos de *Pratylenchus* spp., posiblemente mediante la producción de compuestos antifecundativos o la alteración de señales químicas que regulan la oviposición (Moo-Koh *et al.*, 2022). Según lo señalado por Kassam *et al.* (2023), *Trichoderma* spp. puede alterar la homeostasis hormonal del nematodo mediante la secreción de ácido indolacético y otros compuestos que interfieren con su fisiología reproductiva.

Respecto a la longitud de raíces, los tratamientos T4 y T5 promovieron un mayor desarrollo radicular, evidenciando el doble efecto del biocontrolador: la supresión de nematodos y la estimulación del crecimiento vegetal. Se sustenta en la capacidad de *T. harzianum* para inducir resistencia sistémica adquirida (ISR) y producir fitohormonas como ácido giberélico y ácido indolacético (IAA), que estimulan la elongación celular y la formación de raíces laterales (Singh *et*

al., 2023). Alinç *et al.* (2021), reportaron que la aplicación de *T. harzianum* T22 incrementó la longitud radicular en tomate debido a la acción conjunta de metabolitos promotores del crecimiento y la mejora de la absorción de nutrientes. De manera similar, Sanó *et al.* (2022), observaron un incremento de 25 % en la longitud de raíces en plántulas de banano inoculadas con *Trichoderma asperellum*.

En la variable peso total de raíces por plántula, el tratamiento T4 (1×10^{10} conidios mL^{-1}) registró el mayor peso, superando incluso al tratamiento químico. Este incremento puede atribuirse a la mejora en la estructura radicular y a la reducción del estrés causado por la infestación de nematodos, lo cual permite un mayor desarrollo y exploración del suelo (Ganeshan *et al.*, 2021). Además, *Trichoderma* mejora la solubilización de nutrientes y la disponibilidad de fósforo, hierro y micronutrientes, optimizando la eficiencia fotosintética y el metabolismo vegetal (Castillo Castillo *et al.*, 2025). Resultados similares fueron reportados por Castillo-Arévalo (2022a), quienes observaron un aumento del 30 % en el peso radicular de plantas de plátano tratadas con *T. harzianum* frente a los controles no tratados.

Conclusiones

Los resultados demostraron que *Trichoderma harzianum*, particularmente en la concentración de 1×10^{10} conidios mL^{-1} , constituyó una estrategia de biocontrol altamente eficaz para la supresión de *Pratylenchus* spp. en plántulas de banano, al disminuir de manera significativa la eclosión de huevos, la supervivencia de juveniles y la capacidad reproductiva del nematodo. Este efecto antagonista se vio acompañado por mejoras morfofisiológicas en el sistema radicular, expresadas en un incremento notable de la longitud y el peso total de las raíces, lo que confirma un doble efecto de protección fitosanitaria y bioestimulación vegetal. Estos hallazgos posicionan a *T. harzianum* como una alternativa sostenible y prometedora para su integración en programas de manejo integrado de nematodos, permitiendo reducir la dependencia de agroquímicos y fortalecer la resiliencia del cultivo frente a presiones fitoparasitarias.

Referencias

- Abdulla, G. A., Saleh, H. M., y Al-Hakeem, A. M. (2023). Effects of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma Asperellum* against egg of *meloidogyne incognita* under laboratory condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1213(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012011>
- Ahmad, G., Khan, A., Ansari, S., Khan, A. A., Elhakem, A., Sami, R., y Mohamed, H. I. (2022). Management of root-knot nematode infection by using fly ash and *Trichoderma harzianum* in *Capsicum annum* plants by modulating growth, yield, photosynthetic pigments,

- biochemical substances, and secondary metabolite profiles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1). <https://doi.org/10.15835/nbha50112591>
- Alinç, T., Cusumano, A., Peri, E., Torta, L., y Colazza, S. (2021). *Trichoderma harzianum* strain T22 modulates direct defense of tomato plants in response to *Nezara viridula* feeding activity. *Journal of Chemical Ecology*, 47(4), 455-462. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01260-3>
- Arboleda-Riascos, C. E., Riascos-Ortiz, D. H., Varón De Agudelo, F., Mosquera-Espinosa, A. T., Oliveira, C. M. G., y Muñoz-Flórez, J. E. (2022). *Pratylenchus araucensis* (Rhabditida: Pratylenchidae) a Widely Distributed Nematode in Musa spp. From Colombia. *Journal of Nematology*, 54(1). <https://doi.org/10.2478/jofnem-2022-0057>
- Beteta Alvarado, V. M., Diaz Dumont, J. R., Oré Cierito, L. E., Loarte Aliaga, W. C., García Curo, G., Diaz Tito, L. P., y Malpartida Gutiérrez, J. N. (2022). El compostaje de cáscara de *Musa paradisiaca* L. para la producción de biogás y biometano como estrategia de preservación de la salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(5), 1048-1054. <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2023/05/1428436/594-1733-1-pb.pdf>
- Bucki, P., Qing, X., Castillo, P., Gamliel, A., Dobrinin, S., Alon, T., y Braun Miyara, S. (2020). The genus *Pratylenchus* (Nematoda: Pratylenchidae) in Israel: From taxonomy to control practices. *Plants*, 9(11), 1475. <https://doi.org/10.3390/plants9111475>
- Castillo Castillo, A., Martínez, H. C., Arteaga Alcívar, F. J., y Álava Cruz, D. A. (2025). Rizobacterias y *Trichodermas* antagonistas al control de nematodos fitoparásitos en plátano barraganete (*Musa paradisiaca* L.). *Revista Ciencia y Tecnología*, 18(2), 38-47. <https://doi.org/10.18779/cyt.v18i2.994>
- Castillo-Arévalo, T. (2022a). Alternativas biológicas y químicas para el manejo de Fitonematodos en cultivo de plátano AAB (*Musa paradisiaca* L.) en Rivas, Nicaragua. *Revista Universitaria del Caribe*, 28(01), 95–102. <https://doi.org/10.5377/ruc.v28i01.14449>
- Castillo-Arévalo, T. (2022b). Evaluación in vitro de hongos Hypocreales para el control de *Pratylenchus* ssp, *Scutellonema* ssp y *Helicotylenchus* ssp. *Revista Universitaria del Caribe*, 29(02). <https://doi.org/10.5377/ruc.v29i02.15253>
- Cuzco Jiménez, V. del C., Luna Romero, Ángel E., Carvajal Romero, H. R., y Cervantes Alava, A. R. (2021). Análisis de tendencia de la exportación de banano (*Musa* AAA) en el Ecuador, periodo 1995-2020. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 99–106. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/475>
- d'Errico, G., Greco, N., Viñale, F., Marra, R., Stillitano, V., Davino, S. W., Woo, S. L., y D'Addabbo, T. (2022). Synergistic Effects of *Trichoderma harzianum*, 1,3 Dichloropropene and Organic Matter in Controlling the Root-Knot Nematode *Meloidogyne incognita* on Tomato. *Plants*, 11(21), 2890. <https://doi.org/10.3390/plants11212890>
- de Oliveira, C. M., Oshiquiri, L. H., Almeida, N. O., Steindorf, A. S., da Rocha, M. R., Georg, R. C., y Ulhoa, C. J. (2023). *Trichoderma harzianum* transcriptome in response to the nematode *Pratylenchus brachyurus*. *Biological Control*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105245>
- de Souza Junior, F. J. C. (2023). The root-lesion nematode (*Pratylenchus zeae*) parasitising mandacaru cactus in Northeast of Brazil. *Australasian Plant Disease Notes*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s13314-023-00510-5>
- e Silva, M. T. R., e Silva, B. de A., Alberton, O., Schwengber, R. P., y Dias-Arieira, C. R. (2022). *Rhizophagus clarus* controls *Meloidogyne javanica* and enhances the activity of defense-related enzymes in tomato. *Horticultura Brasileira*, 40(2). <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220205>
- Esteves, I., Maleita, C., Pato, T., Abrantes, I., y Cunha, M. J. (2019). In vitro reproduction of *Pratylenchus neglectus* on carrot discs and investigation of its interaction with *Meloidogyne hispanica* on potato. *European Journal of Plant Pathology*, 153(3), 957-963. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1582-9>
- Ganeshan, K., Vetrivelkalai, P., Bhagawati, B., Gupta, N., Devrajan, K., Raveendran, M., y Balachandar, D. (2021). Endophytic fungi as potential bio-control agents against root knot nematode, *Meloidogyne incognita* in banana. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(29), 7–18. <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i2931536>
- González-León, Y., Ortega-Bernal, J., Anducho-Reyes, M. A., y Mercado-Flores, Y. (2022). *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.520>
- Guo, R., Li, G., Zhang, Z., y Peng, X. (2022). Structures and biological activities of secondary metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Marine drugs*, 20(11), 701. <https://doi.org/10.3390/md20110701>
- Kassam, R., Kranti, K. V. V. S., Yadav, J., Chatterjee, M., Chawla, G., Kundu, A., Hada, A., Thokala, P. D., Shukla, L., Mishra, J., Rana, V. S., Mukhopadhyay, R., Phani, V., y Rao, U. (2023). Exploration of rhizosphere-dwelling nematophagous *Trichoderma* spp. using novel 'bait technique' with root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Biological Control*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105327>
- López Martínez, T. de los Á., Páramo Aguilera, L. A., y Delgado Silva, H. D. (2022). Reproducción masiva de hongos *Trichodermas* previamente identificados de suelos Nicaragüenses en diferentes sustratos orgánicos.

- Nexo Revista Científica, 35(03), 700-712. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i03.15000>
- Moo-Koh, F. A., Cristóbal-Alejo, J., Andrés, M. F., Martín, J., Reyes, F., Tun-Suárez, J. M., y Gamboa-Angulo, M. (2022). *In Vitro* assessment of organic and residual fractions of nematicidal culture filtrates from thirteen tropical *Trichoderma* strains and metabolic profiles of most-active. *Journal of Fungi*, 8(1), 82. <https://www.mdpi.com/2309-608X/8/1/82>
- Nafady, N. A., Sultan, R., El-Zawahry, A. M., Mostafa, Y. S., Alamri, S., Mostafa, R. G., Hashem, M., y Hassan, E. A. (2022). Effective and Promising strategy in management of tomato root-knot nematodes by *Trichoderma harzianum* and arbuscular mycorrhizae. *Agronomy*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy12020315>
- Nomura, R.B.G., Lopes-Caitar, V.S., Hishinuma-Silva, S. M., Zamboni Machado, A. C., Conrado Meyer, M., y Marcelino-Guimarães, F. C. (2024). *Pratylenchus brachyurus*: status and perspectives in Brazilian agriculture. *Trop. plant pathol.* 49, 573–589. <https://doi.org/10.1007/s40858-024-00669-x>
- Piedra-Bonilla, E., y Echeverría, Y. (2024). Changes in the adaptive capacity of livelihood vulnerability to climate change in ecuador's tropical commodity crops: banana and cocoa. En: Florez, H., Leon, M. (eds) Applied Informatics. ICAI 2023. *Communications in Computer and Information Science*, vol 1874. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46813-1_24
- Sandoval-Ruiz, R., Gómez-Alpizar, L., Humphreys-Pereira, D. A., y Flores-Chaves, L. (2022). Molecular identification of root-lesion nematodes, *Pratylenchus* spp. in agricultural crops from Costa Rica. *Agronomia Mesoamericana*, 34(1). <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49445>
- Sanó, L., Oliveira, L. L. B. de, Leão, M. D. M., Santos, J. E. de Á. D., Medeiros, S. C. de, Schneider, F., Sousa, A. B. O. de, Taniguchi, C. A. K., Muniz, C. R., Grangeiro, T. B., y Silva, C. de F. B. da. (2022). *Trichoderma longibrachiatum* as a biostimulant of micropropagated banana seedlings under acclimatization. *Plant Physiology and Biochemistry*, 190, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.09.008>
- Singh, P., Singh, R., Madhu, G. S., y Singh, V. P. (2023). Seed biopriming with *Trichoderma harzianum* for Growth promotion and drought tolerance in rice (*Oryza sativa*). *Agricultural Research*, 12(2), 157-162. <https://doi.org/10.1007/s40003-022-00641-8>
- Soto-Valenzuela, J. O., Álvarez-Vera, M. S., Vázquez Vázquez, J. E., y Ricardo Ricardo, G. B. (2024). Evaluación físico, químico y microbiológico del suelo en cultivos de *Musa paradisiaca* Cavendish y *Elaeis guineensis* Jac. Provincia de los Ríos. *Alfa Revista De Investigación En Ciencias Agronómicas Y Veterinarias*, 8(22), 110-125. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.252>
- Subash, M, y Perumalsamy, M. (2024). Green degumming of banana pseudostem fibers for yarn manufacturing in textile industries. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4), 5285-5294. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02850-1>

