

***Trichoderma asperellum*: persistencia en el suelo bajo distintos métodos de aplicación en cultivo de banano.**

***Trichoderma asperellum*: persistence in soil under different application methods in the banana crop.**

Ivanna Gabriela Tuz-Guncay¹

E-mail: ivannat23@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0085-3495>

Andrés Simbaña-Villarreal¹

E-mail: esimbania@pucesi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5584-4054>

José Nicasio Quevedo-Guerrero^{2,3}

E-mail: jnquevedo@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8974-5628>

Edison Fabricio Vera-Cruz³

E-mail: verafabricio22@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7950-5049>

1. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra
2. Universidad Técnica de Machala
3. Departamento de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Agrícolas y Biológicas de Agrisum, Ditaba

Resumen

La persistencia de *T. asperellum* en el suelo es un factor determinante para maximizar su eficacia como agente de biocontrol y bioestimulante en sistemas agrícolas sostenibles. Este estudio evaluó la permanencia de *T. asperellum* en la rizósfera del cultivo de banano (*Musa spp.*) bajo seis métodos de aplicación: T0 (testigo absoluto), T1 (inóculo en polvo), T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL), T3 (inóculo en polvo + biocarbón), T4 (inóculo diluido en agua) y T5 (inóculo con aminoácidos). Se cuantificó el porcentaje de colonias de *T. asperellum* cada 30 días durante 180 días, además del peso de raíces vivas, enfermas, muertas y totales, densidades poblacionales de los nematodos fitoparásitos *Radopholus similis*, *Helicotylenchus* y *Pratylenchus*, y el peso de racimos. Los resultados indicaron que el tratamiento T2 promovió la mayor persistencia del hongo, superior colonización rizosférica, incremento significativo en biomasa radicular sana, disminución de raíces necróticas y reducciones notables en las poblaciones de nematodos, especialmente *R. similis*. Asimismo, se observó un incremento del 12% de productividad. Estos resultados sugieren que la formulación con tecnología SLL mejora la estabilidad del inoculante en el suelo, potenciando los efectos benéficos de *T. asperellum* sobre la salud edáfica y el rendimiento del cultivo de banano.

Palabras clave: Carbono, microbiota, suelo supresivo, biocontrol.

Abstract

Persistence after soil application of *T. asperellum* is a determining factor for its efficacy as a biocontrol and biostimulant agent in sustainable agricultural production systems. This study evaluated the persistence of *Trichoderma asperellum* in the rhizosphere of banana crops after six consecutive monthly applications with 5 treatments and a control: T0 (absolute control), T1 (powder inoculum), T2 (powder inoculum with SLL technology), T3 (powder inoculum + biochar), T4 (inoculum diluted in water), and T5 (inoculum with amino acids). The variables evaluated were the percentage of *T. asperellum* colonies persistence every 30 days, the weight of live, diseased, dead, and total roots, plant-parasitic nematode populations, and bunch weight. The results indicated that treatment T2 promoted greater fungal persistence, with greater rhizospheric colonization, a

significant increase in healthy root mass, a decrease in diseased/dead roots, and notable reductions in plant pathogenic nematode populations, especially *R. similis*. Likewise, a 12% increase in productivity was observed. These results suggest that the SLL technology formulation improves inoculant persistence in the soil, enhancing the beneficial effects of *T. asperellum* on soil health and banana crop yield.

Key words: Carbon, microbiota, suppressive soil, biocontrol.

Introducción

El banano es una de las frutas más consumidas a nivel mundial y se cultiva en más de 130 países (Madushani et al., 2023). En Ecuador, representa el principal producto agrícola de exportación, por lo que su producción eficiente y sostenible es de gran importancia económica. Sin embargo, la agricultura enfrenta grandes desafíos en el control de plagas, así como en el uso racional de los recursos, en un contexto donde se busca reducir los costos de producción y minimizar los riesgos ambientales. Las prácticas tradicionales, además de generar impactos negativos, amenazan la seguridad alimentaria (Cruz-Cárdenas et al., 2021), lo mencionado ha impulsado el uso de tecnologías más sostenibles, como el uso de agentes de control biológico (ACB). Entre estos, *Trichoderma asperellum*, se destaca por sus múltiples mecanismos de acción para suprimir enfermedades y estimular el crecimiento vegetal. No obstante, aunque existen diversas formulaciones comerciales disponibles, aún no se ha garantizado su permanencia en el suelo después de su aplicación, lo que limita su eficacia y adopción en campo (Madushani et al., 2023). Por esta razón, el presente estudio busca evaluar la persistencia de *Trichoderma asperellum* en el suelo mediante diferentes métodos de aplicación en el cultivo de banano, con el fin de generar información técnica que contribuya al manejo sostenible del cultivo y al uso eficiente de bioinsumos.

Microbiota del suelo

El suelo es el principal recurso para la producción de alimentos, debe tener capacidad supresiva para que no exista desequilibrio en la presencia de los microorganismos, en un suelo supresivo un patógeno no se puede establecer y si logra establecerse no será causante de enfermedad, existen dos mecanismos de supresión, las condiciones físico químicas del suelo y las interacciones de los ACB como antibiosis, parasitismo y competencia (Calvo, 2021). La actividad biológica edáfica es importante, entre estos microorganismos se encuentran aquellos que promueven el crecimiento y desarrollo vegetal a través de la producción de fitohormonas, enzimas y vitaminas, otros producen antibióticos y compuestos orgánicos volátiles que suprimen el ataque de patógenos, son inductores de resistencia, mejoran los procesos fisiológicos, en general presentan una amplia gama de beneficios en su aplicación como práctica agrícola (Cruz-Cárdenas et al., 2021).

T. asperellum

T. asperellum es un hongo del suelo que puede sobrevivir en varios rangos de pH, su temperatura óptima está entre 25-35°C, es altamente competitivo, presenta micoparasitismo contra patógenos causando la inhibición de su crecimiento por la segregación de metabolitos secundarios antimicrobianos, prospera en un amplia variedad de entornos, agrícolas, forestales, montañosos, desérticos, pastizales, demostrando así su adaptación y su presencia a nivel global (Asghar et al., 2024). Se usa como agente de biocontrol, biofertilizante y biorremediador (Asghar et al., 2024), no genera resistencia, no contamina el medio ambiente y es aceptado en la agricultura orgánica ya que cumple con los requisitos del mercado internacional (Ferreira & Musumeci, 2021). El género posee gran capacidad de degradación, descomposición y biorremediación, aspectos relevantes en la agricultura, la inoculación con *T. asperellum* en residuos de cosecha acelera la descomposición de celulosa y hemicelulosa en menos tiempo con la producción de xilanasa y celulasa, metabolizan pesticidas como carbendazim, diclorvos, sulfonilurea e hidrocarburos aromáticos policíclicos (fenantreno y pireno), DDT, dieldrin, pentacloronitrobenzeno y pentaclorofenol, contribuyendo así a la reducción de contaminación (Zin & Badaluddin, 2020) y (Andrade-Hoyos et al., 2023). El uso

de *T. asperellum* como mejorador en el rendimiento de los cultivos ha sido demostrado en algunas investigaciones como el incremento de la producción entre el 86 y 78% en el cultivo de chile (*Capsicum chinense* Jacq.) (Gallegos-Morales *et al.*, 2022), esto se logró a partir de la regulación proteica asociada a la fotosíntesis, haciendo más eficiente el uso del nitrógeno y la absorción de nutrientes (Abdullah *et al.*, 2021)

Materiales y métodos

Localización del área experimental: El estudio se realizó en la Agrícola "Sarahí" en el cantón El Guabo, provincia de El Oro, Ecuador. La plantación consta de 55 ha sembradas con banano del clon Williams Subgrupo Cavendish el cual se encuentra en producción, la ubicación geográfica corresponde a las coordenadas 3°15'12.6" S y 79°49'00.7" W, (Figura 1).

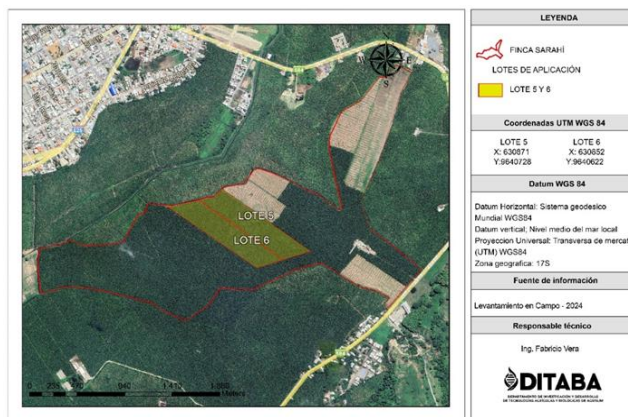


Figura 1. Ubicación georreferenciada del área de estudio.

Material biológico: Se utilizó un producto biológico a base de *T. asperellum*, obtenido a partir de aislamientos realizados en suelos agrícolas locales. La cepa fue identificada mediante análisis morfológicos y moleculares, y validada por el Laboratorio de Fitopatología de Agrocalidad, ubicado en la Vía Interoceánica Km 14½ y Eloy Alfaro, Granja del MAG, provincia de Pichincha, Ecuador. El producto presenta una pureza del 100 % en caja Petri y un 97 % de germinación. La concentración del inóculo fue de 5×10^{10} UFC g⁻¹, la cuantificación se realizó mediante conteo en placa tras realizar diluciones seriadas (10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6}), sembrando 100 µL en PDA.

Diseño experimental y Tratamientos: Se aplicó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro bloques, seis tratamientos y cuatro repeticiones.

Tabla 1. Croquis del Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con 4 bloques, 6 tratamientos y 4 repeticiones utilizado en el ensayo de campo.

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
T2R2	T5R3	T1R2	T3R4
T4R1	T1R3	T0R1	T2R3
T0R4	T3R1	T5R4	T1R1
T5R1	T4R4	T3R2	T0R2
T1R4	T2R1	T4R2	T5R2
T3R3	T0R3	T2R4	T4R3

Los tratamientos son las diferentes formulaciones y métodos de aplicación de *T. asperellum*, que se señalan en la Tabla 2. La dosis que se aplicó en los tratamientos fue de 250 g*ha⁻¹ de inóculo en polvo cuya concentración fue de 5 x 10¹⁰ UFC.

Tabla 2. Tratamientos, formulaciones y métodos de aplicación usados en el ensayo.

Tratamiento	Formulación de <i>T. asperellum</i>	Método de aplicación	Fertilizante Aplicado en todos los tratamientos
T0	Sin aplicación de <i>T. asperellum</i>	No aplica	Mezcla física aplicada 3,5 sacos *ha ⁻¹ : N (18,26%) P (2,50%) K (24%) Mg (3%) S (0.84%) Bo (0.38%) Si (3.96%) Zn (0.15%) Ca (0.26%)
T1	Inóculo en polvo	Mezclado con fertilización química	
T2	Inóculo en polvo con tecnología SLL	Mezclado con fertilización química	
T3	Inóculo en polvo mezclado con biocarbón	Mezclado con fertilización química	
T4	Inóculo diluido en agua	Vía drench (después de fertilización química)	
T5	Inóculo diluido en agua con aminoácidos	Vía drench (después de fertilización química)	

Cada uno de estos niveles representa una variación del tratamiento aplicado. El experimento está diseñado para identificar si estas variaciones producen efectos significativos en la respuesta evaluada. Para el análisis de los datos estadísticos se usó el programa IBM® SPSS® Statistics 20.

Trampeo y análisis de colonias de *T. asperellum*

El muestreo se realizó mediante el uso de trampas para microorganismos, las cuales son cámaras con arroz precocido (Velasquez, 2024), con modificaciones realizadas por del autor. La entrada de las trampas fue cubierta con una malla textil y aseguradas con ligas. Cada trampa tiene un diámetro de boca de 12,4 cm, una base de 9,4 cm y una altura de 103 mm, el material es plástico y de color gris. Las trampas se colocaron en el área de aplicación y se retiraron del campo 5 días después para ser llevadas al laboratorio, donde se fotografiaron las colonias y se realizó la identificación mediante microscopía, para esta actividad se extrajo una muestra de la malla y se colocó en portaobjetos con azul de lactofenol, se colocó cubreobjetos y se observó a 40x. Para registrar el porcentaje de *T. asperellum* en el suelo, se colocaron 2 trampas por cada repetición de cada tratamiento, éstas se ubicaron en el área de fertilización a los 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días de haberse aplicado el inóculo. Cada trampa genera una imagen que fue analizada con el software ArcGIS. Este análisis incluye la generación de firmas espectrales y la aplicación de algoritmos de clasificación para mapear las diferentes clases de microorganismos capturados en cada trampa (Lugo, 2021). Calculando el área total de la trampa en cm² y el área ocupada por las colonias de *T. asperellum*, se determinaron los porcentajes encontrados en cada trampa mediante la función ráster del software.

Determinación de sanidad en las raíces de plantas de banano

El peso total de raíces, raíces sanas, enfermas y muertas de las plantas de banano y la población de nematodos se tomaron a los 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días de las aplicaciones: para estas variables se siguió la metodología propuesta por (Vargas, 2016), se seleccionaron 5 plantas prontas a la floración por tratamiento y luego se enviaron al laboratorio Agrobiolab Cía. Ltda. (ISO 17025) para su respectivo análisis y generación de resultados.

Rendimiento del cultivo según método de aplicación de inóculo de *T. asperellum*

Se tomó el peso de los racimos de banano de las plantas tratadas con el inóculo de *T. asperellum* a los 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días de la aplicación: Para la variable peso de racimos, los datos se recolectaron con la ayuda del sistema de pesaje XR5000 Tru-Test + XASS IoT, donde se obtuvieron los datos en tiempo real. Se pesaron los racimos provenientes de cada tratamiento previamente identificados en un intervalo de 30 días hasta el final de la evaluación.

Resultados y discusión

Análisis de ANOVA y prueba de Tukey

En los resultados del ANOVA el T2 es el tratamiento más efectivo, con un incremento significativo en el porcentaje de colonias a lo largo del tiempo presentado un CV de 0.201%. Así mismo las interacciones Tratamiento × Tiempo son significativas para T1, T2, T3 y T5, lo que indica que esos tratamientos modifican la dinámica de colonización en el tiempo. Cabe señalar que el tiempo solo no tiene efecto significativo sin considerar el tratamiento ($p = 0.266$), esto se corrobora al observar los resultados del T0 (testigo) que no muestra un cambio significativo en el tiempo. Los resultados obtenidos (Tabla 3) demuestran que la aplicación de *T. asperellum* mediante formulaciones avanzadas, como la tecnología SLL (T2), promueve una colonización persistente en la rizósfera del banano, con diferencias estadísticamente significativas desde los 30 hasta los 180 días posteriores a la aplicación.

Tabla 3. ANOVA y Tukey para Persistencia del inóculo de *T. asperellum* en campo.

Tratamientos	PTch0 (%)	PTch30 (%)	PTch60 (%)	PTch90 (%)	PTch120 (%)	PTch150 (%)	PTch180 (%)
T0	12,20*	11,98	11,78	10,48	12,63	7,46	9,65
T1	8,15	13,32	14,21	17,43*	17,83*	19,52*	21,76**
T2	7,80	32,73**	37,89***	37,93***	36,18***	37,17***	56,29***
T3	7,2	23,31*	24,50*	19,03*	25,21**	26,40**	21,06**
T4	15,18**	12,76	16,17	13,19	15,37	13,54	16,70
T5	8,06	13,24	21,90*	14,70	18,51	18,48	19,83*
Sig. (0,05)	0.041	0.003	0.000	0.000	0.001	0.012	0.008

Este hallazgo concuerda con investigaciones recientes que destacan la eficacia de formulaciones sólidas y encapsuladas para mejorar la supervivencia y actividad biocontroladora de *T. asperellum* en el suelo (Vindas-Reyes *et al.*, 2024). Asimismo, el tratamiento con biocarbón (T3) mostró incrementos significativos en la colonización de *T. asperellum* lo que sugiere que el biocarbón actúa como un soporte físico y fuente de carbono que favorece el establecimiento del hongo en la rizósfera. Por otro lado, las aplicaciones líquidas (T4) y aquellas combinadas con aminoácidos (T5) presentaron una menor eficacia en términos de persistencia del hongo, lo que podría atribuirse a la falta de estructuras protectoras que resguarden al inóculo de factores ambientales adversos. Estos hallazgos respaldan la utilización de tecnologías de formulación avanzadas y soportes físicos como estrategias efectivas para mejorar la persistencia y eficacia de *T. asperellum* (Rodríguez *et al.*, 2020) en el manejo integrado de enfermedades en el cultivo de banano.

Análisis de la persistencia de *T. asperellum* en el suelo según el método de aplicación.

Al inicio de la evaluación, el porcentaje de *T. asperellum* en el suelo oscila entre el 8 al 14 % para todos los tratamientos, el T0 y T4 (0 DDA) presentan una mayor población, esto se atribuye a la presencia de cepas nativas de *Trichoderma* spp. en el suelo antes de la aplicación, a través del tiempo la población decrece, a los 180 días el T0 tiene un 10%, los tratamientos T1, T4 y T5 presentan leves incrementos y descensos poblacionales durante el ensayo debido a que no poseen un soporte como el T2 y T3 que garantiza una liberación lenta o un microhábitat protector por lo que el inóculo no logra sostenerse en el tiempo, el T2 con tecnología SLL expone un mayor

incremento y estabilidad en el tiempo (Figura 2) mientras el T3 con carbón vegetal también presenta incrementos poblacionales.

Los resultados obtenidos indican que la persistencia de *T. asperellum* varió significativamente según el método de aplicación utilizado. El tratamiento T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) fue el más eficaz, alcanzando un porcentaje superior al 55% de colonias a los 180 días después de la aplicación (DDA), lo que indica una alta capacidad de permanencia y adaptación en la rizósfera. Esta tecnología de liberación lenta probablemente actuó como una barrera protectora frente a factores ambientales adversos, promoviendo una liberación gradual del inóculo (Rodrigues *et al.*, 2020), quienes destacan la efectividad de formulaciones encapsuladas para prolongar la viabilidad de biocontroladores en campo.

Asimismo, el tratamiento T3 (inóculo con biocarbón) mostró una persistencia destacada durante los primeros 90 días, atribuible a las propiedades fisicoquímicas del biocarbón, que provee un microhábitat protector y mejora la retención de humedad y nutrientes, condiciones que favorecen la colonización de *T. asperellum* (Zhao *et al.*, 2022). En contraste, los tratamientos T4 (inóculo diluido en agua) y T5 (inóculo con aminoácidos) registraron niveles intermedios de colonización, lo que sugiere que, aunque estas formulaciones pueden facilitar el establecimiento inicial del hongo, su persistencia en el tiempo es limitada si no se aplican con matrices protectoras.

El tratamiento T1 (inóculo en polvo sin aditivos) evidenció una escasa persistencia, lo que puede atribuirse a la falta de un mecanismo de protección frente a la competencia microbiana y la fluctuación de condiciones edáficas, tal como advierten (Vindas-Reyes *et al.*, 2024). Finalmente, el testigo absoluto (T0) mantuvo bajos niveles de *T. asperellum* durante todo el periodo, validando que los aumentos observados en los demás tratamientos fueron efecto directo de la inoculación. Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente la formulación y el método de aplicación del biocontrolador, ya que influyen de manera crítica en su persistencia en el suelo y, por tanto, en su eficacia biológica.

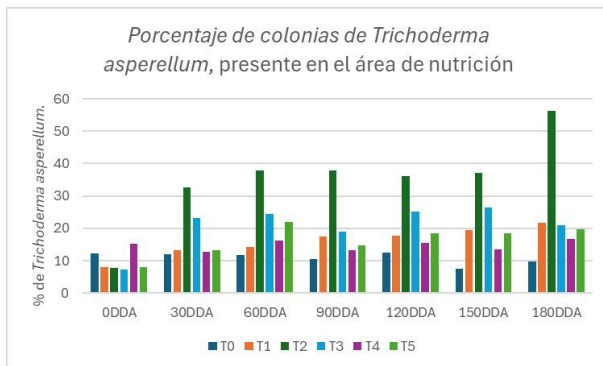


Figura 2. Porcentaje de colonias de *T. asperellum* por tratamiento durante el tiempo.

Determinación de sanidad en las raíces de plantas de banano

El análisis del peso de raíces vivas evidencia que el tratamiento T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) fue significativamente superior al resto (Figura 3), alcanzando 160 g a los 180 días después de la aplicación (DDA), lo que indica una mayor actividad radicular y vitalidad del sistema radicular. Este resultado puede explicarse si tenemos en cuenta que el inóculo está encapsulado con una tecnología que le suministra protección ante los factores adversos en campo, como la falta de humedad, falta de alimento y refugio para las esporas, al mismo tiempo se produce una liberación lenta del inóculo al suelo como tal, lo que favorece una colonización constante por *T. asperellum*, mejorando el microbiota del suelo, la estructura radicular estimulando paralelamente la producción de auxinas y otros metabolitos promotores del crecimiento de las plantas (Asghar *et al.*, 2024).

Además, se ha demostrado que *T. asperellum* promueve el desarrollo radicular al inducir respuestas hormonales sistémicas, lo que mejora la absorción de agua y nutrientes, paralelamente activa los promotores de defensas de manera eficiente en los cultivos, haciéndolos más resilientes al cambio climático (Gallegos-Morales *et al.*, 2022).

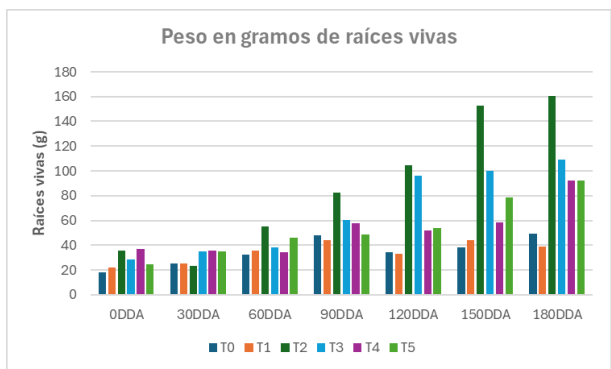


Figura 3. Peso de raíces vivas por tratamiento durante el tiempo.

El tratamiento T3 (inóculo + biocarbón) también presentó una mejora progresiva, destacándose desde los 60 hasta los 150 DDA, lo que respalda el efecto positivo del biocarbón como soporte físico y fuente de nutrientes que mejora la retención de humedad y sirve como refugio microbiano (Zhao *et al.*, 2022). En cambio, los tratamientos T1, T4 y T5 mostraron incrementos más moderados, sin alcanzar el mismo nivel de eficacia, lo que sugiere que la formulación y el medio de aplicación juegan un papel determinante en la eficacia del biocontrolador.

Por su parte, el testigo (T0) mantuvo un desarrollo radicular limitado, reflejando la falta de estímulo biológico y mayor susceptibilidad al estrés biótico y abiótico (Abdullah *et al.*, 2021). Estos hallazgos refuerzan el papel fundamental de *T. asperellum* como bioestimulante y protector del sistema radicular cuando se aplica en formulaciones adecuadas (Vindas-Reyes *et al.*, 2024).

El comportamiento del peso de raíces enfermas a lo largo del ensayo revela diferencias notables entre los tratamientos (Figura 4). El tratamiento T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) mostró una disminución progresiva en la cantidad de raíces enfermas, alcanzando uno de los valores más bajos (alrededor de 30 g) a los 180 DDA. Este resultado sugiere un efecto protector del *T. asperellum* aplicado con tecnología SLL, probablemente por su capacidad para colonizar rápidamente la rizósfera, competir con patógenos, inducir resistencia sistémica en las plantas hospedantes y degradar directamente estructuras fúngicas patógenas mediante enzimas hidrolíticas como quitinasas y glucanasas (Zin & Badaluddin, 2020). Por su parte, el tratamiento T3 (inóculo + biocarbón) también evidenció una reducción consistente en el peso de raíces enfermas, lo que puede atribuirse al papel del biocarbón como mejorador del microambiente edáfico, al incrementar la retención de agua, aireación y capacidad de albergar microorganismos benéficos (Zhao *et al.*, 2022). Estos resultados confirman que la combinación del biocontrolador con un soporte físico adecuado potencia su eficacia en la supresión de enfermedades radiculares, especialmente aquellas causadas por hongos patógenos y nematodos.

En contraste, los tratamientos T0 (testigo), T1 (inóculo sin tecnología) y T4 (inóculo en agua) mantuvieron niveles elevados de raíces enfermas, incluso con un repunte hacia los 180 DDA. Esto sugiere que la falta de mecanismos de liberación sostenida o de protección del inoculante compromete su funcionalidad a lo largo del tiempo. Estos hallazgos destacan que la formulación del inóculo es determinante para su permanencia y funcionalidad en el sistema radicular (Vindas-Reyes *et al.*, 2024). Así, la menor incidencia de raíces enfermas en los tratamientos T2 y T3 confirma la capacidad de *T. asperellum* para reducir el impacto de patógenos en raíces de banano cuando es aplicado mediante tecnologías apropiadas.

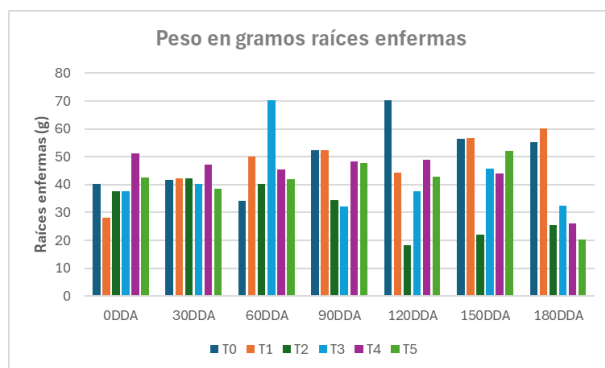


Figura 4. Peso de raíces enfermas por tratamiento durante el tiempo.

La evolución del peso de raíces muertas muestra una tendencia decreciente más marcada en los tratamientos T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) y T3 (inóculo en polvo + biocarbón), especialmente a partir de los 90 días después de la aplicación (DDA), alcanzando valores mínimos de aproximadamente 30 g y 35 g respectivamente a los 180 DDA. Esta reducción puede estar asociada a la efectividad de *T. asperellum* en la protección de las raíces frente a patógenos del suelo como *Fusarium spp.*, *Pythium spp.* y nematodos fitoparásitos, mediante mecanismos como el micoparasitismo, la producción de compuestos antimicrobianos y la competencia por espacio y nutrientes.

El tratamiento T2, con tecnología SLL, parece haber favorecido una liberación prolongada y estable del inóculo, lo que podría haber asegurado una colonización persistente de la rizósfera y una interacción constante con las raíces, disminuyendo significativamente la senescencia prematura y la necrosis radicular (Zhao *et al.*, 2022).

Asimismo, el biocarbón presente en T3 actúa como un soporte físico protector del inoculante, además de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo (porosidad, CEC, retención de agua), lo cual crea un entorno favorable para el desarrollo de raíces sanas y la supresión de patógenos (Zhao *et al.*, 2022). En contraste, los tratamientos T0 (testigo), T1 (inóculo en polvo sin soporte) y T4 (inóculo en agua) mantuvieron valores más elevados y estables de raíces muertas, lo que evidencia una menor eficacia del biocontrolador bajo condiciones sin tecnología de soporte o liberación controlada. Estos resultados resaltan la importancia de formular adecuadamente los bioinsumos para asegurar su persistencia y funcionalidad en el tiempo, especialmente en cultivos como el banano, altamente susceptibles a problemas radiculares.

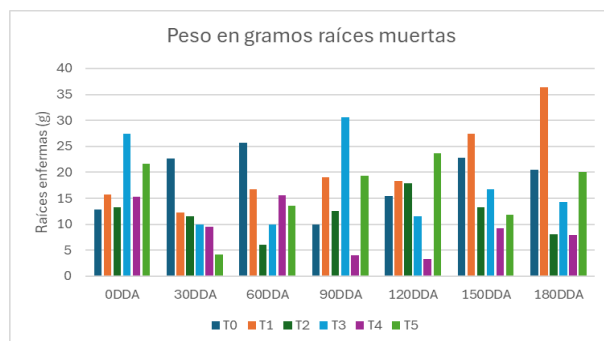


Figura 5. Peso de raíces muertas por tratamiento durante el tiempo.

La variable peso total de raíces permite una visión integral del desarrollo radicular bajo la influencia de los distintos tratamientos (Figura 6). En este caso, los tratamientos T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) y T3 (inóculo + biocarbón) mostraron consistentemente los valores más altos a lo

largo del ensayo, alcanzando máximos de aproximadamente 180 g y 160 g respectivamente a los 180 DDA. Esta mayor biomasa radicular total sugiere que la combinación del *T. asperellum* con tecnologías de soporte adecuadas favorece el equilibrio entre crecimiento de raíces vivas y reducción de raíces enfermas o muertas, lo cual es indicativo de un sistema radicular funcional y saludable.

La presencia activa y persistente de *T. asperellum* en la rizósfera, promovida por las tecnologías SLL y biocarbón, contribuye no solo al control biológico de patógenos, sino también a la estimulación del crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas como ácido indolacético (AIA), el aumento en la solubilización de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo (Zhao *et al.*, 2022). Estas condiciones se traducen en una arquitectura radicular más desarrollada, lo cual es crítico en el cultivo de banano, donde la salud del sistema radicular se asocia directamente con la productividad y tolerancia al estrés.

Por otro lado, los tratamientos T0 (testigo) y T1 (inóculo sin soporte) presentaron los valores más bajos en peso total de raíces, especialmente al final del ciclo, lo que sugiere un desarrollo radicular limitado posiblemente por la presión de patógenos del suelo, baja persistencia del biocontrolador o ausencia de mecanismos que promuevan una rizosfera activa. Estos resultados indican que la efectividad de los bioinoculantes depende en gran medida de su formulación y del entorno edáfico que facilite su establecimiento y funcionalidad. En resumen, el mayor peso total de raíces observado en T2 y T3 destaca la sinergia positiva entre el uso de *T. asperellum* y tecnologías que promueven su persistencia y eficacia, constituyéndose en una estrategia efectiva para fortalecer el sistema radicular del banano.

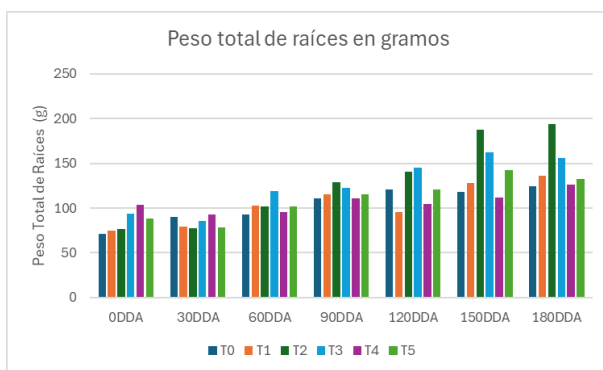


Figura 6. Peso total de raíces por tratamiento durante el tiempo.

Determinación de las poblaciones de nematodos

Los resultados obtenidos muestran una disminución progresiva en las poblaciones de nematodos fitoparásitos (Figura 7 y 8) en los tratamientos T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) y T3 (inóculo + biocarbón), siendo estos significativamente más bajos que el testigo absoluto (T0) y otros tratamientos hacia los 180 días después de aplicación (DDA). Esta reducción puede atribuirse a la acción antagonista de *T. asperellum*, que ha sido ampliamente documentada por su capacidad para parasitar huevos y larvas de nematodos, producir metabolitos tóxicos y estimular defensas sistémicas en la planta hospedera (Yao *et al.*, 2023).

R. similis, uno de los nematodos más destructivos en el cultivo de banano, fue el más afectado en los tratamientos con mayor persistencia del hongo (Figura 7) otras investigaciones han demostrado que formulaciones sólidas y orgánicas de *T. asperellum* reducen eficientemente sus poblaciones y los daños asociados al sistema radicular (Yao *et al.*, 2023). El tratamiento T3, al incorporar biocarbón, no solo mejoró la persistencia del biocontrolador, sino que también modificó favorablemente las propiedades del suelo, lo que puede limitar el movimiento y la reproducción de nematodos (Huang *et al.*, 2015).

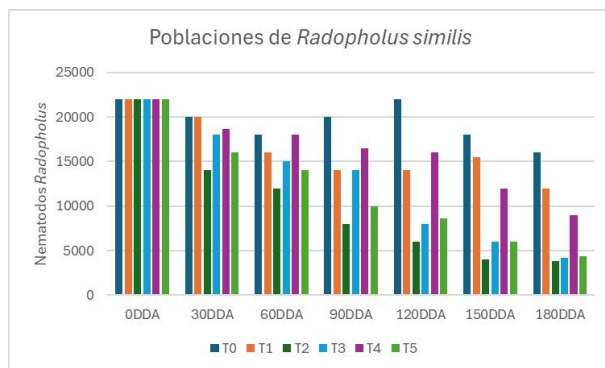


Figura 7. Población de *R. similis* por tratamiento durante el tiempo.

Por su parte, T2, formulado con tecnología de liberación lenta (SLL), mantuvo niveles efectivos del hongo en el suelo durante más tiempo, permitiendo una presión constante sobre las poblaciones de nematodos, en contraste, el tratamiento testigo (T0) y T4 (inóculo diluido en agua) mostraron las mayores densidades poblacionales de nematodos a lo largo del ensayo, reflejando la ineficacia del tratamiento sin tecnología de soporte o ausencia del inoculante. Esto resalta la importancia de la formulación en el éxito del biocontrol de nematodos.

En conjunto, los resultados confirman el potencial de *T. asperellum*, especialmente cuando se combina con tecnologías que favorecen su persistencia en el suelo, como una herramienta eficaz en el manejo integrado de nematodos fitoparásitos en el cultivo de banano.

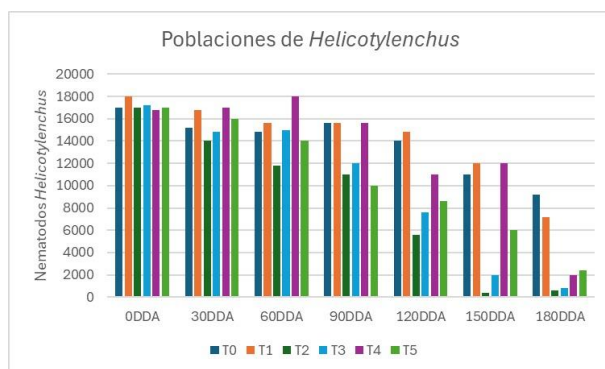


Figura 8. Población de *Helicotylenchus* por tratamiento durante el tiempo.

Rendimientos del cultivo

En la Tabla 3, se observan los rendimientos por cada tratamiento, se han conformado 3 grupos donde los más bajos pesos están en el T1 y T0, los pesos medianos los tiene el T4, T5 y T6, el mayor peso lo obtiene el T2 con 70.37 lb. El peso de racimos es una variable clave en la productividad del cultivo de banano, ya que refleja directamente el estado sanitario y nutricional del sistema radicular y la eficiencia fisiológica de la planta (Figura 9). En este ensayo, los tratamientos T2 (inóculo en polvo con tecnología SLL) y T3 (inóculo + biocarbón) presentaron los mayores pesos de racimos, superando significativamente al testigo absoluto (T0) y a otros tratamientos, con valores que alcanzaron entre 20 a 10 lb más por racimo respectivamente.

Tabla 3. Análisis de rendimientos de acuerdo con el peso de racimos.

	Tratamiento	N	Subconjunto		
			1	2	3
DHS de Tukey	T1 (FQ en mezcla con <i>Trichoderma</i> en polvo)	56	60.5591a		
	T0 (FQ)	56	60.7341a		
	T4 (<i>Trichoderma</i> en polvo vía drench post FQ)	56		64.3345b	
	T5 (Mezcla de Aminoácidos + <i>Trichoderma</i> en polvo vía drench post FQ).	56		64.3636b	
	T3: mezcla de FQ + CV + <i>Trichoderma</i> en polvo	56		65.8632b	
	T2: FQ en mezcla con <i>Trichoderma</i> tecnología SLL	56			70.3705c
	Sig.		1.000	0.440	1.000

Este comportamiento está estrechamente relacionado con la mejor salud radicular observada en estos tratamientos, donde se registraron mayores pesos de raíces vivas, menores niveles de raíces enfermas y muertas, y una menor incidencia de nematodos fitoparásitos. La relación entre un sistema radicular sano y un mayor rendimiento ha sido bien documentada, especialmente en banano, donde el vigor de las raíces se correlaciona positivamente con la absorción eficiente de agua y nutrientes, y en consecuencia, con una mayor acumulación de biomasa en los frutos (Yao et al., 2023). El uso de *T. asperellum* en combinación con tecnologías como la liberación lenta (SLL) o el biocarbón no solo mejora el control de patógenos del suelo, sino que también promueve el crecimiento vegetal mediante la síntesis de auxinas, la solubilización de fósforo y la estimulación de la microbiota benéfica asociada a la rizósfera (Gallegos-Morales et al., 2022) esto genera un ambiente más favorable para el desarrollo fisiológico completo del cultivo, lo que se refleja en una mayor productividad.

En cambio, el testigo (T0) y los tratamientos T1 (inóculo sin soporte) y T4 (inóculo diluido en agua) mostraron los menores pesos de racimos, probablemente debido al escaso efecto del inoculante o a su baja persistencia en el suelo, lo cual limitó el impacto positivo sobre el sistema radicular y, por ende, sobre la producción.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones que indican que el uso de microorganismos benéficos como *T. asperellum*, formulados de manera adecuada, puede ser una alternativa eficiente para aumentar la productividad agrícola de forma sostenible (Vindas-Reyes et al., 2024).

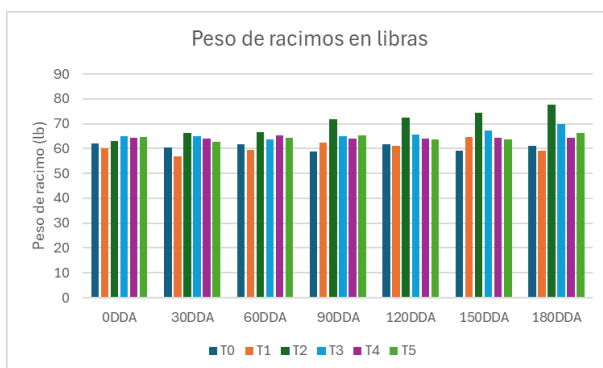


Figura 9. Peso de racimos por tratamiento durante el tiempo de aplicación.

Conclusión

La eficacia de *T. asperellum* como agente de biocontrol y promotor del crecimiento en el cultivo de banano está directamente relacionada con el método de formulación y aplicación utilizado. En particular, los tratamientos T2 (inóculo en polvo con tecnología de liberación lenta - SLL) y T3 (inóculo en polvo + biocarbón) mostraron una mayor persistencia del hongo en el suelo, acompañada de un incremento en el peso de raíces vivas, una reducción en el peso de raíces muertas, menor incidencia de nematodos fitoparásitos (*Radopholus similis*, *Helicotylenchus spp.*, *Pratylenchus spp.*) y un incremento de 10 a 12 libras en peso de racimos.

Estos hallazgos sugieren que el uso de tecnologías que mejoren la disponibilidad y la actividad del biocontrolador en la rizósfera es determinante para alcanzar efectos agronómicos positivos y sostenibles. La incorporación de soportes físicos como el biocarbón o de mecanismos de liberación controlada constituye una estrategia eficaz para potenciar el rendimiento del cultivo y reducir el impacto de patógenos edáficos sin recurrir a agroquímicos sintéticos. En este contexto, *T. asperellum* formulado con tecnologías avanzadas representa una herramienta prometedora para integrar prácticas de manejo biológico en sistemas productivos de banano orientados hacia la sostenibilidad.

Referencias

- Abdullah, N. S., Doni, F., Mispan, M. S., Saiman, M. Z., Yusuf, Y. M., Oke, M. A., & Suhaimi, N. S. M. (2021). Harnessing Trichoderma in Agriculture for Productivity and Sustainability. *Agronomy*, 11(12), 2559. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122559>
- Andrade-Hoyos, P., Rivera-Jiménez, M. N., Landero-Valenzuela, N., Silva-Rojas, H. V., Martínez-Salgado, S. J., & Romero-Arenas, O. (2023). Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita Trichoderma spp. en la agricultura: Una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología*, 55(4), 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.005>
- Asghar, W., Craven, K. D., Kataoka, R., Mahmood, A., Asghar, N., Raza, T., & Iftikhar, F. (2024). The application of Trichoderma spp., an old but new useful fungus, in sustainable soil health intensification: A comprehensive strategy for addressing challenges. *Plant Stress*, 12, 100455. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100455>
- Bhandari, S., Pandey, K. R., Joshi, Y. R., & Lamichhane, S. K. (2021). An overview of multifaceted role of Trichoderma spp. For sustainable agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(1), 72-79. <https://doi.org/10.26832/24566632.2021.0601010>
- Calvo, J. (2021). Suelos supresivos y su papel en el manejo de enfermedades. *Environment & Technology*, 2(1), 48-63. <https://doi.org/10.56205/ret.2-1.3>
- Cruz-Cárdenas, C., Zelaya, L., Sandoval, G., De Los Santos-Villalobos, S., Rojas, E., Chávez, I., & Ruíz, S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: Consideraciones y retos. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 12(5), 899-913. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2905>
- Ferreira, F. V., & Musumeci, M. A. (2021). Trichoderma as biological control agent: Scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(5), 90. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>
- Gallegos-Morales, G., Espinoza-Ahumada, C. A., Figueroa-Reyes, J., Méndez-Aguilar, R., Rodríguez-Guerra, R., Salas-Gómez, A. L., & Peña-Ramos, F. M. (2022). Compatibilidad de especies de

- Trichoderma en la producción y biocontrol de marchitez del chile. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(2). <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3066>
- Huang, W., Ji, H., Gheysen, G., Debode, J., & Kyndt, T. (2015). Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root-knot nematode infections. *BMC Plant Biology*, 15(1), 267. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0654-7>
- Lugo, F. (2021). *ANALISIS MULTITEMPORAL PARA DETERMINAR LA EXPANSION URBANA EN EL MUNICIPIO DE SOACHA CUNDINAMARCA EN EL PERIODO 2015-*. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/2b4e1237-5064-491a-ba9c-edd1cb7ed737/content>
- Madushani, M., Priyadarshani, T., Madhushan, K., Tharaka, H., Menike, G., Weerasinghe, P., Sirisena, U., & Dissanayake, D. (2023). Solid Formulation of *Trichoderma virens* for the Management of Banana Anthracnose Caused by *Colletotrichum musae*. *Tropical Agricultural Research*, 35(1), 260-274. <https://doi.org/10.4038/tar.v35i3.8792>
- Rodrigues, C., Bilesky-José, N., De Lima, R., & Fernandez, L. (2020). Encapsulation of *Trichoderma harzianum* Preserves Enzymatic Activity and Enhances the Potential for Biological Control. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 225. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00225>
- Vargas, R. (2016). *MUESTREO DE RAÍCES PARA ANÁLISIS DE NEMATODOS EN BANANO (Musa AAA)*. Corbana. https://www.researchgate.net/publication/332627243_Muestreo_raices_para_analisis_de_nematodos_en_banano_Musa_AAA#fullTextFileContent
- Velasquez, G. (2024). Uso de microorganismos eficientes y su impacto térmico en el compostaje de residuos orgánicos. *Scienceevolution*, 4(12), 100-106. <https://doi.org/10.61325/ser.v4i12.131>
- Vindas-Reyes, E., Chacón-Cerdas, R., & Rivera-Méndez, W. (2024). Trichoderma Production and Encapsulation Methods for Agricultural Applications. *AgriEngineering*, 6(3), 2366-2384. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030138>
- Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (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>
- Zhao, Y., Wang, X., Yao, G., Lin, Z., Xu, L., Jiang, Y., Jin, Z., Shan, S., & Ping, L. (2022). Advances in the Effects of Biochar on Microbial Ecological Function in Soil and Crop Quality. *Sustainability*, 14(16), 10411. <https://doi.org/10.3390/su141610411>
- Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. For agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.09.003>