


Agente de Biocontrol del Suelo: *Trichoderma* spp. contra *Ralstonia solanacearum* Raza 2 en Banano Soil Biocontrol Agent: *Trichoderma* spp. Against *Ralstonia solanacearum* Race 2 in Bananas

Juan Antonio Torres-Rodríguez^{1†} , Kimberly Magaly López Cedeño² ,
Karen Rafaela Mayorga-Morejón^{3†} , Karla Nicole Factos-Laiño⁴ ,
Paola Manoella Rodulfo-Acuña³ , Pedro Isaias Terrero-Yepez³  y
Cristian Manuel Muñoz-Romero¹ 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501, Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (J.A.T.R.), (C.M.M.R.).

[†] Autores para correspondencia: jatorres@uteq.edu.ec; raphaela8mayorga@gmail.com

² Instituto Superior Tecnológico La Maná, Av. Amazonas entre Miguel Iturralde y Héroes del Cenepa, La Libertad. 050202 La Maná, Cotopaxi, Ecuador; (K.M.L.C.).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Tropical Pichilingue. km 5 Vía Quevedo-El Empalme, Sector Pichilingue. 20150 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (K.R.M.M.), (P.M.R.A.), (P.I.T.Y.).

⁴ Investigador independiente. Calle Q s/n, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (K.N.F.L.).

RESUMEN

La marchitez bacteriana del banano causada por *Ralstonia solanacearum* raza 2, constituye una de las principales amenazas fitosanitarias del Ecuador, particularmente en Quevedo, provincia de Los Ríos. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficacia de cinco aislamientos de *Trichoderma* spp. como biocontrol de *R. solanacearum* y su efecto sobre el desempeño vegetativo de plantas de banano en condiciones de invernadero. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con cinco tratamientos de *Trichoderma* spp. de diferentes sitios geográficos y origen botánico, T1-H (*T. asperellum*), T2-PS (*T. asperellum*), T3-R (*T. harzianum*), T4-S (*T. harzianum*) y T5-R (*T. asperellum*), junto con un control positivo (infectado solo con el fitopatógeno) y un control negativo (sin inocular). Se realizaron evaluaciones quincenales de la incidencia y la severidad (escala 0-4, expresada en %), se calculó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad normalizada (rAUDPC) como métrica integrada del desarrollo temporal, se estimó la eficiencia de control de cada aislamiento (Abbott) y se registraron variables de crecimiento (altura, diámetro del pseudotallo, número de hojas, áreas foliar y radicular, y biomasa fresca y seca por órgano y total). En comparación con el control infectado por *R. solanacearum*, T5-R, T4-S y T1-H redujeron la severidad desde 30 DAI y disminuyeron el rAUDPC en ~72, 60 y 52%, respectivamente; además, preservaron altura, diámetro del pseudotallo y número de hojas a niveles comparables al control agua (CA-2), con una mejora del área radicular en T5-R. La incidencia final bajó 28-43% pero sin diferencias estadísticas y las biomásas fresca/seca mostraron solo tendencias de recuperación. El efecto biocontrol fue dependiente del aislamiento, T5-R y T4-S pueden ser una alternativa de biocontrol en el cultivo de banano, al combinar contención de la progresión temporal de la marchitez bacteriana, sin afectar el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Palabras clave: bioestimulante, eficiencia de control, fitopatógeno, marchitez bacteriana, rAUDPC.

SUMMARY

Bacterial wilt of banana caused by *Ralstonia solanacearum* race 2 is one of the main phytosanitary threats in Ecuador, particularly in Quevedo, Los Ríos Province. The objective of this study was to evaluate the efficacy of five *Trichoderma* spp. isolates as



Cita recomendada:

Torres-Rodríguez, J. A., López-Cedeño, K. M., Mayorga-Morejón, K. R., Factos-Laiño, K. N., Rodulfo-Acuña, P. M., Terrero-Yepez, P. I., & Muñoz-Romero, C. M. (2026). Agente de Biocontrol del Suelo: *Trichoderma* spp. contra *Ralstonia solanacearum* raza 2 en Banano. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-20. e2489. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2489>

Recibido: 13 de noviembre de 2025.

Aceptado: 10 de marzo de 2026.

Artículo. Volumen 44.

Mayo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

biocontrol agents against *R. solanacearum* and their effect on the vegetative performance of banana plants under greenhouse conditions. A completely randomized design (CRD) was used with five *Trichoderma* spp. treatments from different geographical locations and botanical origins: T1-H (*T. asperellum*), T2-PS (*T. asperellum*), T3-R (*T. harzianum*), T4-S (*T. harzianum*), and T5-R (*T. asperellum*), along with a positive control (inoculated only with the phytopathogen) and a negative control (non-inoculated). Incidence and severity were evaluated fortnightly using a 0–4 scale expressed as a percentage. The relative area under the disease progress curve (rAUDPC) was calculated as an integrated measure of temporal disease development, control efficiency was estimated using Abbott's formula, and growth variables, including plant height, pseudostem diameter, number of leaves, leaf area, root area, and fresh and dry biomass by organ and total biomass, were recorded. Compared with the *R. solanacearum*-inoculated control, T5-R, T4-S, and T1-H reduced disease severity from 30 days after inoculation (DAI) and decreased rAUDPC by approximately 72, 60, and 52%, respectively. In addition, these treatments maintained plant height, pseudostem diameter, and number of leaves at levels comparable to the negative control, with an improvement in root area observed in T5-R. Final disease incidence decreased by 28–43%, although no statistically significant differences were detected, and fresh and dry biomass showed only recovery trends. The biocontrol effect depended on the isolate evaluated; T5-R and T4-S may represent viable biocontrol alternatives in banana cultivation, as they effectively limited the temporal progression of bacterial wilt without negatively affecting plant growth and development.

Index words: biostimulant, control efficiency, phytopathogen, bacterial wilt, rAUDPC.

INTRODUCCIÓN

El banano constituye uno de los pilares productivos más relevantes para Ecuador y para la economía agrícola de América Latina (FAO, 2022). En 2024, el banano cubrió 180 965 ha plantadas (de las cuales se cosecharon 175.818 ha), con una producción anual de 7558.208 Mg y ventas de 7409.225 Mg, lo que reafirma su papel como eje del sistema agroexportador del país (INEC, 2025). No obstante, la sostenibilidad del sector enfrenta riesgos significativos derivados de enfermedades que prosperan bajo condiciones tropicales favorables para el desarrollo de los fitopatógenos (Velásquez, Castroverde y He, 2018).

Entre las amenazas fitosanitarias más severas para las musáceas se encuentra la marchitez bacteriana (Moko), causada por *Ralstonia solanacearum* raza 2. Este fitopatógeno vascular penetra por raíces o a través de la inflorescencia, coloniza los vasos del xilema y los obstruye, lo que interrumpe el transporte de agua y provoca marchitez sistémica y finalmente, la muerte de la planta (Álvarez, Pantoja, Ceballos y Gañán, 2013; Blomme *et al.*, 2017). La elevada diversidad genética del complejo *R. solanacearum*, junto con su capacidad de persistir en suelo, agua y hospedantes alternos y su amplia tolerancia ecológica, dificulta su manejo y favorece su diseminación (Álvarez, López y Biosca, 2008; Yahiaoui *et al.*, 2017).

Como primera respuesta frente a la marchitez bacteriana se utiliza el control químico; sin embargo, su eficacia frente a fitopatógenos vasculares del suelo suele ser limitada por la dificultad de alcanzar los haces de xilema, la persistencia del inóculo en rizósfera y residuos, y la necesidad de aplicaciones repetidas que elevan costos y riesgo de resistencias, y efectos no objetivo sobre el microbioma del suelo (Yuliar, Nion y Toyota, 2015; Walder *et al.*, 2022). En este contexto, el control biológico entendido como el uso de microorganismos benéficos y/o sus metabolitos, así como compuestos naturales se posiciona como alternativa y complemento dentro del Manejo Integrado de Plagas (MIP), al contribuir a reducir la dependencia de productos químicos sintéticos, mejorando la sostenibilidad del sistema productivo (Baker, Green y Loker, 2020; Deguine *et al.*, 2021).

Trichoderma spp. emerge como una opción de biocontrol en musáceas por su versatilidad ecológica, disponibilidad en formulaciones comerciales y compatibilidad con estrategias de MIP, con evidencia reciente de desempeño en agroecosistemas bananeros y de integración práctica con insumos agrícolas (Martínez, Ribera, Schwarze y De France, 2023). Su uso se ha extendido desde ensayos controlados hasta evaluaciones en campo, mostrando consistencia operativa en distintos tipos de suelo y esquemas de manejo, además de un perfil ambiental favorable y costos de implementación competitivos frente a alternativas químicas de uso repetido (Yao *et al.*, 2023; Du *et al.*, 2024).

La eficacia de control de *Trichoderma* spp. se basa en su efecto en la rizósfera y sobre el fitopatógeno, mediante diferentes mecanismos de acción como, micoparasitismo (reconocimiento, adhesión, penetración hifal acompañados de enzimas líticas como quitinasas, β -1,3-glucanasas y proteasas), antibiosis mediante metabolitos secundarios (incluidos compuestos volátiles) que inhiben germinación y crecimiento, competencia por espacio y recursos, producción de sideróforos y activación de defensas del hospedero (priming de vías JA/ET) que limita la colonización y reduce la severidad (Alfiky y Weisskopf, 2021; Yao et al., 2023).

Además del control fitosanitario, *Trichoderma* spp. presenta efectos bioestimulantes comprobados en diversos cultivos. Contribuye a la adquisición de nutrientes, incluida la solubilización de fosfatos y la movilización de Fe mediante sideróforos (Sood et al., 2020), modula rutas hormonales (auxinas, citoquininas y señales JA/ET) que optimizan la emisión de raíces laterales y el área foliar (Contreras-Cornejo, Macías, Cortés y López, 2009), emite compuestos volátiles que favorecen elongación y eficiencia fotosintética, y preacondiciona frente a estrés abiótico (salinidad, sequía, temperatura) mediante mayor capacidad antioxidante y acumulación de osmólitos (Garnica-Vergara et al., 2016; You et al., 2022; Sorahinobar, Yusefieh, Rezayian y Shahbazi, 2025). En banano, la inoculación con *Trichoderma* spp. se ha asociado con incrementos en longitud y volumen radical, mejor estado nutricional (N-P-K), mayor vigor vegetativo y rendimiento en condiciones de campo (Luo et al., 2023).

Pese al amplio estudio sobre *Trichoderma* spp. como agente de biocontrol, la evidencia específica para la marchitez bacteriana del banano (*Moko*, *Ralstonia solanacearum* raza 2) sigue siendo escasa, en particular cuando se consideran de forma conjunta la supresión de la enfermedad y las respuestas de crecimiento. En este estudio, bajo condiciones de invernadero, se evaluó la capacidad de diferentes aislados de *Trichoderma* spp. para reducir la severidad de la marchitez bacteriana y promover el desempeño vegetativo de plántulas de banano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Condiciones Climáticas del Sitio Experimental

El estudio se realizó en el Instituto Nacional De Investigaciones Agropecuarias (INIAP- Pichilingue), ubicado en el km 5 de la vía Quevedo - El Empalme, en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, sus coordenadas geográficas son 01° 27' 27" S y 79° 27' 42" O, con una altitud de 73 m. El sitio corresponde a la zona ecológica Bosque Húmedo Tropical (BH-T) y presenta clima tropical húmedo, con promedios anuales de temperatura de 24.9 °C, humedad relativa de 84%, precipitación de 2295 mm y heliofanía de 870 h, según registros históricos de la estación meteorológica del Pichilingue-INAMHI (INAMHI, 2021), ubicada en las inmediaciones del invernadero.

Diseño de la Investigación

En esta investigación se analizó el efecto de cinco cepas de *Trichoderma* spp. aislados de Manabí y Santo Domingo contra *Ralstonia solanacearum* raza 2 en condiciones de invernadero. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con siete repeticiones, donde cada repetición correspondió a una planta individual, para un total de 7 plantas por tratamiento y 49 plantas para todo el experimento. Los tratamientos consistieron en la aplicación individual de cada cepa de *Trichoderma* spp. seguido de la inoculación con *R. solanacearum*, además de un control positivo (solo fitopatógeno) y un control negativo (agua estéril) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de las cepas de *Trichoderma* spp y *Ralstonia solanacearum* raza 2.
Table 1. Description of *Trichoderma* spp. and *Ralstonia solanacearum* race 2 strains.

Tratamiento	Especie	Origen geográfico	Origen botánico	Procedencia física	<i>Trichoderma</i> spp.	<i>Ralstonia solanacearum</i> raza 2
T1-H	<i>T. asperellum</i>	Manabí	Plátano	Hoja	1 × 10 ⁶ conidios mL ⁻¹	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
T2-PS	<i>T. asperellum</i>	Santo Domingo	Plátano	Pseudotallo	1 × 10 ⁶ conidios mL ⁻¹	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
T3-R	<i>T. harzianum</i>	Manabí	Abacá	Raíz	1 × 10 ⁶ conidios mL ⁻¹	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
T4-S	<i>T. harzianum</i>	Santo Domingo	Abacá	Suelo	1 × 10 ⁶ conidios mL ⁻¹	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
T5-R	<i>T. asperellum</i>	Santo Domingo	Plátano	Raíz	1 × 10 ⁶ conidios mL ⁻¹	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
CR-1	<i>R. solanacearum</i> raza 2	Los Ríos	Banano	Pseudotallo	-	1 × 10 ⁸ UFC mL ⁻¹
CA-2	Agua	-	-	-	-	-

Metodología Experimental: Preparación de Inóculos e Inoculación.

Se utilizaron plántulas de banano (*Musa* AAA cv. Williams) provenientes de micropropagación, con altura uniforme (~10 cm) al trasplante. Los aislamientos de *Trichoderma* spp. se reactivaron en Papa Dextrosa Agar (PDA; Difco™, BD, EE. UU.) e incubaron a 25 °C por 7 días. Las suspensiones conidiales se prepararon añadiendo agua destilada estéril con Tween-80 al 0.01% (v/v), frotando suavemente la colonia y filtrando a través de gasa estéril; la concentración se ajustó a 1×10^6 conidios mL⁻¹ mediante recuento en cámara de Neubauer (Brand®, Alemania). El aislamiento de *Ralstonia solanacearum* raza 2 (colección del Programa de Musáceas, INIAP) se reactivó en Agar Nutritivo (Oxoid™, Reino Unido) y se confirmó en medio TZC (TTC, Sigma-Aldrich, EE. UU.) por morfología típica. Los cultivos se incubaron a 28–30 °C por 24–48 h. La suspensión bacteriana se ajustó a 1×10^8 UFC mL⁻¹ usando McFarland 0.5 y verificación por OD₆₀₀ calibrada a curva UFC-OD; se corroboró la concentración por recuentos en placa (diluciones seriadas).

Las aplicaciones de *Trichoderma* spp. se iniciaron a los 15 días después del trasplante (DDT) mediante drench dirigido al sustrato y zona radicular (20 mL por maceta por evento), con una frecuencia de 3 aplicaciones por semana hasta 72 h antes de la inoculación del fitopatógeno. La inoculación con *R. solanacearum* se efectuó a los 30 DDT mediante drench de 20 mL por maceta alrededor del sistema radicular. El progreso de la enfermedad se monitoreó semanalmente hasta que el control con fitopatógeno mostró síntomas avanzados como, severa marchitez de toda la planta, colapso del pseudotallo y necrosis generalizada, la severidad se registró en escala ordinal 0–4. Dado el carácter cuarentenario de *R. solanacearum*, el ensayo se condujo bajo bioseguridad nivel invernadero: acceso restringido, pediluvios con amonio cuaternario de 5^{ta} generación (KlinPak®, Ecuador), desinfección obligatoria de calzado y herramientas, riego controlado sin drenajes libres, y gestión de residuos (sustrato y plantas) mediante autoclave previo a incineración. No se aplicaron agroquímicos durante el ensayo para evitar interferencias con el agente de biocontrol.

Variables Evaluadas y Métodos de Cuantificación

Crecimiento Vegetativo

Las variables de crecimiento se registraron en 15, 30, 45 y 60 días después de la inoculación (DAI). La altura se midió desde la base del pseudotallo (nivel del sustrato) hasta la inserción en "V" de la última hoja plenamente expandida, con flexómetro (Stanley® Fatmax® Autolock 5 m, clase II ± 0.5 mm a 1 m) y promedio de dos lecturas, los valores se expresaron en centímetros. El diámetro del pseudotallo se determinó a 5 cm por encima del sustrato con calibrador digital (Mitutoyo® Absolute Digimatic ± 0.02 mm), tomando dos lecturas ortogonales y reportando su promedio, los valores se expresaron en milímetros. El número de hojas solo se contabilizó a los 60 días, correspondió a hojas plenamente expandidas y funcionales ($\geq 50\%$ del limbo verde), excluyendo hojas en emergencia o senescentes (Wang, Li, Zhou, Wang y Li, 2022; Martínez, Guerrero, Carrillo y Unda, 2024).

Cuantificación de Área Foliar y Radicular

El área foliar (cm²) y el área radicular (cm²) se determinaron por análisis de imágenes con ImageJ® v1.54g (Schneider, Rasband y Eliceiri, 2012). Los órganos se dispusieron extendidos y sin solapamientos sobre un fondo blanco mate; las imágenes digitales se capturaron con la cámara en posición perpendicular e iluminación difusa y uniforme para evitar sombras y reflejos. En cada fotografía se incluyó una regla milimetrada para la calibración píxel-longitud. Para hojas, se procesaron todas las láminas plenamente expandidas por planta y se sumaron sus áreas; para raíces, se trabajó con el sistema radical lavado (sin restos de sustrato), extendido suavemente para minimizar cruces, registrando el área proyectada total por planta. Al abrir las imágenes en el software, se utilizó la herramienta de línea para medir la referencia de escala y establecer la relación entre píxeles y unidades de medida. El área de cada muestra se cuantificó con Analyze Measure, reportando el valor en cm² (Torres-Rodríguez et al., 2025).

Determinación de Biomasa Fresca y Seca

Las plántulas se extrajeron cuidadosamente de las macetas; las raíces se lavaron con agua destilada para remover sustrato adherido y se secó el exceso de humedad superficial con papel absorbente sin comprimir el tejido. Posteriormente, cada planta se fraccionó en hojas, pseudotallo y raíces con tijeras de acero inoxidable previamente desinfectadas. La biomasa fresca (g) de cada fracción se determinó inmediatamente tras el

fraccionamiento, utilizando una balanza digital (Sartorius Entris 2202-1S, Sartorius AG, Göttingen, Alemania, 2 kg ± 1 g). Se calculó la biomasa fresca total como la suma de las tres fracciones. Para la biomasa seca (g), cada fracción se colocó en bolsas de papel identificadas. Las muestras se secaron en estufa de convección forzada a 65 °C durante 72 h o hasta peso constante (diferencia < 0.02-0.03 g entre dos pesadas separadas por 24 h). Tras el secado, las muestras se pesaron en la misma balanza. Se calcularon biomasa seca total (suma de fracciones).

Incidencia por *Ralstonia solanacearum* raza 2

La incidencia de la enfermedad (IE) se evaluó por planta como la proporción de plantas enfermas respecto del total de plantas evaluadas, según la metodología modificada de Adomako et al. (2024). Se consideró planta enferma a aquella con síntomas compatibles con marchitez bacteriana. El porcentaje de incidencia de la enfermedad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$IE = (Pe/Pt) \times 100 \quad (1)$$

Donde Pe es el número de plantas enfermas y Pt el número total de plantas evaluadas.

Severidad por *Ralstonia solanacearum* Raza 2

La severidad se evaluó en 15, 30, 45 y 60 DAI con una escala ordinal 0-4 adaptada de Bakar, Badrun, Ahmad y Abu-Bakar (2018). La escala utilizada fue la siguiente: 0 = sin síntomas; 1 = clorosis leve en hojas inferiores; 2 = clorosis marcada con necrosis incipiente y marchitez ligera; 3 = marchitez evidente en varias hojas con necrosis progresiva y caída; 4 = marchitez severa de toda la planta con colapso del pseudotallo y necrosis generalizada (muerte). Las plantas muertas se consignaron como 4 desde su primera observación; cuando fue necesario, la lectura externa se corroboró con decoloración vascular. Con los puntajes individuales se calculó la severidad porcentual (SE%) mediante la siguiente fórmula:

$$SE\% = \left[\sum_{i=0}^4 n_i s_i / (N \times K) \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde s_i es el puntaje (0-4), n_i el número de plantas con ese puntaje en la fecha, N el total de plantas evaluadas y K el valor máximo de la escala ($K = 4$); las pérdidas no atribuibles a la enfermedad se excluyeron de N .

Área Bajo la Curva de Progresión de la Enfermedad (rAUDPC)

La progresión temporal de la severidad se resumió mediante el Área bajo la Curva de Progreso de la Enfermedad (AUDPC), empleando el método trapezoidal. Para cada planta se registró la severidad en porcentaje (SE%) en 15, 30, 45 y 60 días después de la inoculación (DAI) y se estimó el AUDPC como:

$$AUDPC = \sum_{i=1}^{n-1} [(Y_i + Y_{i+1}) / 2] \times (t_{i+1} - t_i) \quad (3)$$

Donde Y_i es la severidad (DS%, 0-100) en el tiempo T_i (DAI) y n el número de evaluaciones. La muerte por la enfermedad (puntaje 4) se consideró DS%= 100 desde su primera observación en adelante. Para facilitar comparaciones entre estudios, se reportó el AUDPC normalizado (rAUDPC) (Mukherjee, Mohapatra, Rao y Nayak, 2005):

$$rAUDPC(\%) = (AUDPC / (T_n - T_i) \times 100) \times 100 \quad (4)$$

Obteniendo valores en el rango 0-100%, donde valores menores indican menor intensidad temporal de la enfermedad.

Eficiencia de los Tratamientos de *Trichoderma* spp. para el Control de *Ralstonia solanacearum* Raza 2

Se determinó la eficiencia de la aplicación de las cepas de *Trichoderma* spp. contra el fitopatógeno *Ralstonia solanacearum* raza 2 mediante la siguiente fórmula propuesta por Abbott (1925):

$$E(\%) = ((Ct - Tt)/Ct) \times 100 \quad (5)$$

Donde Ct es la severidad enfermedad en el control (sin *Trichoderma* spp.); Tt es la severidad enfermedad con aplicación de *Trichoderma* spp.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software R Studio versión 4.4.2 (R Core Team, 2024) utilizando los paquetes stats, car, lme4/lmerTest, emmeans, multcomp. Para crecimiento vegetativo (altura y diámetro del pseudotallo) se efectuaron comparaciones por día (15, 30, 45 y 60 DAI) mediante ANOVA de una vía con Tratamiento como efecto fijo. El área foliar, el área radicular, la biomasa fresca y seca por órgano (hoja, tallo, raíz) se analizaron por separado mediante ANOVA de una vía. La incidencia final (60 DAI) se modeló con un modelo lineal generalizado (GLM) de familia binomial con enlace logit, con tratamiento como efecto fijo, usando únicamente los tratamientos inoculados con *R. solanacearum* (CR-1 y T1-T5), el control con agua (CA-2) se reportó de forma descriptiva. La severidad (escala 0-4 transformada a DS%) se evaluó en el tiempo con un modelo lineal mixto gaussiano de medidas repetidas con efectos fijos de Tratamiento, Día y su interacción, e intercepto aleatorio por planta; las comparaciones entre tratamientos dentro de cada día se obtuvieron a partir de medias marginales estimadas. La progresión de la enfermedad se resumió como rAUDPC (%), calculado por la regla trapezoidal y normalizado por la duración del periodo, y luego analizado con ANOVA de una vía. La eficiencia de control (Abbott, %) se calculó al final respecto del control con fitopatógeno (CR-1) y se comparó solo entre los tratamientos con *Trichoderma* spp. (T1-T5) mediante ANOVA de una vía. En las variables paramétricas se verificaron los supuestos mediante Shapiro-Wilk (normalidad), Levene (homogeneidad) e inspección gráfica de residuos. Se reportaron medias marginales estimadas (EMMs) \pm IC95% y las diferencias múltiples se evaluaron con ajuste de Tukey ($\alpha = 0.05$); cuando el contraste global no fue significativo, no se mostraron letras en las figuras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No se detectaron diferencias estadísticas significativas en la altura de las plantas a los 15 DAI ($p > 0.05$). A los 30, 45 y 60 DAI el efecto de tratamiento fue significativo ($p < 0.05$) y el tratamiento control con el fitopatógeno (CR-1) registró siempre la menor altura, con 11.59; 12.53 y 15.23 cm ($p < 0.05$). Los tratamientos T1-H, T4-S y T5-R no mostraron diferencias estadísticas entre sí ($p > 0.05$), además, estos tratamientos no presentaron diferencias con el tratamiento control solo con agua (CA-2) ($p > 0.05$). Sin embargo, el tratamiento T3-R a los 30, 45 y 60 DAI no fue superior al fitopatógeno (CR-1; $p > 0.05$). A los 60 DAI, los tratamientos con *Trichoderma* spp. incrementaron la altura entre 16.0 y 28% respecto al control con fitopatógeno (CR-1 = 15.23 cm). Todos los tratamientos de *Trichoderma* spp. mitigaron la reducción de crecimiento asociada a la infección con *R. solanacearum* (Figura 1).

La reducción sistemática de la altura en el control con el fitopatógeno (CR-1) es coherente con la fisiopatología de la marchitez bacteriana, *R. solanacearum* coloniza y obstruye el xilema, compromete el transporte hídrico y provoca marchitez y detención del crecimiento, incluso antes del colapso final de la planta (Genin y Denny, 2012). En contraste, los aislamientos de *Trichoderma* T1-H, T4-S y T5-R presentaron alturas comparables al control sin el fitopatógeno, lo que sugiere que atenuaron el impacto de la infección. Esta respuesta es consistente con la evidencia de que *Trichoderma* spp. mejora el estado funcional de la raíz y la adquisición de recursos, modula redes hormonales asociadas al desarrollo (auxinas/ET/JA), con efectos en vigor y biomasa aérea bajo estrés biótico (Dutta *et al.*, 2023). La ausencia del incremento del crecimiento en la cepa T3-R frente al control con fitopatógeno demuestra que los efectos de *Trichoderma* spp. son dependientes de la cepa, del hospedero y del contexto edáfico-ambiental, por lo que no todas las combinaciones hospedero-aislamiento expresan el mismo potencial bioestimulante o de biocontrol (Pozo, Herrero, Martín, Santamaría y Poveda, 2024).

En todos los tiempos, el control con fitopatógeno (CR-1) presentó los menores diámetros del pseudotallo (12.67; 13.26; 14.14 y 14.60 mm a 15, 30, 45 y 60 DAI, respectivamente), mientras que el control con agua (CA-2) registró los valores más altos (16.00; 16.69; 17.14 y 17.36 mm, respectivamente). En contraste, los tratamientos con *Trichoderma* spp. mantuvieron o recuperaron el grosor del pseudotallo hasta niveles estadísticamente con el control agua (CA-2) ($p > 0,05$). Al final del experimento (60 DAI), T1-H (17.01 mm), T2-PS (17.03 mm), T4-S (16.87 mm) y T5-R (17.11 mm) fueron superiores a CR-1 (14.60 mm) ($p < 0.05$), lo que representa incrementos del 15 a 17% respecto al control infectado. Sin embargo, T3-R no mostró diferencias estadísticas con el fitopatógeno. Los resultados sugieren que la colonización por *Trichoderma* spp. amortigua el estrés vascular inducido por *R. solanacearum* (Figura 2).

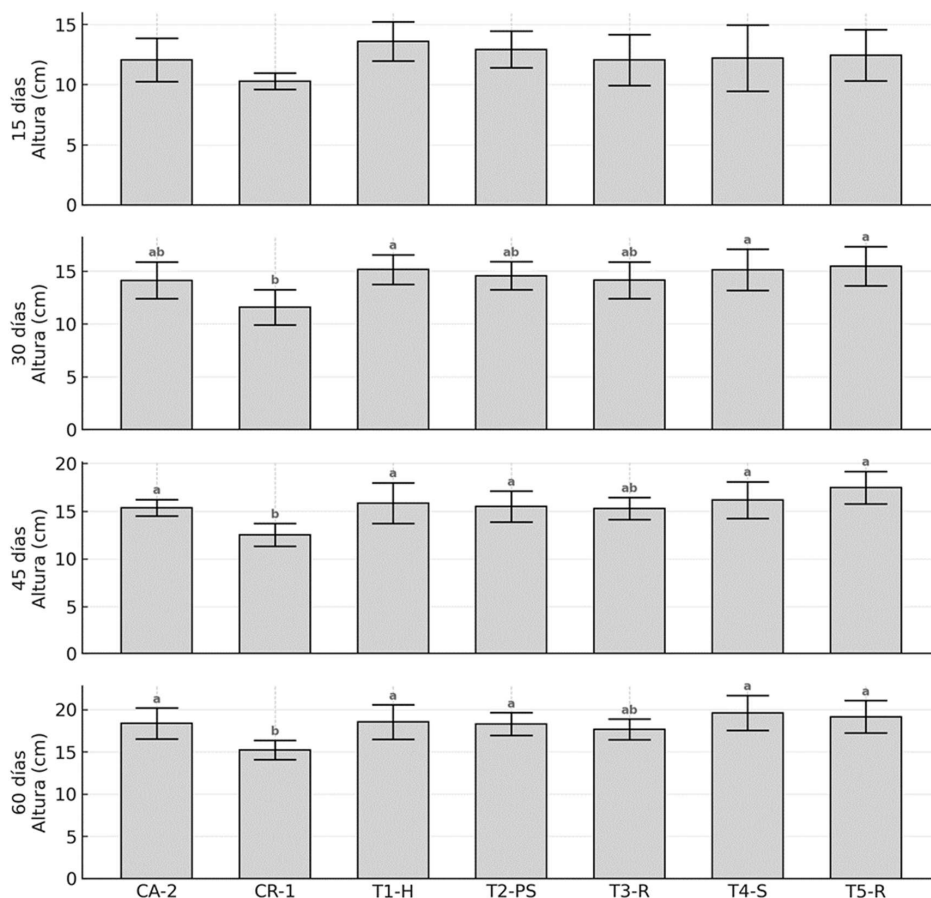


Figura 1. Altura de planta por tratamiento y tiempo bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Cada panel muestra la altura de la planta a los 15, 30, 45 y 60 días después de la inoculación (medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%). Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$) dentro de cada día; cuando no aparecen letras, no se detectaron diferencias significativas. CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 1. Plant height by treatment and time under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. Each panel shows plant height at 15, 30, 45, and 60 days after inoculation (estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs). Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$) within each day; when no letters appear, no significant differences were detected. CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

R. solanacearum (CR-1) coloniza el xilema, produce exopolisacáridos y taponamiento de vasos, que comprometen la conductividad hidráulica, el turgor y, en consecuencia, el crecimiento radial del pseudotallo (Lowe-Power, Khokhani y Allen, 2018; Vaillau y Genin, 2023). Las formulaciones con *Trichoderma* spp. mantuvieron/recuperaron el grosor del pseudotallo hasta valores similares del control agua (CA-2) al final del ensayo (T1-H, T2-PS, T4-S y T5-R). Estos resultados pueden estar relacionados con la mejora del estado antioxidante e inducción de resistencia (ISR) que atenúan la progresión de síntomas y el estrés vascular (Dutta et al., 2023; Santoyo et al., 2024). La aplicación de *Trichoderma reesei* en banano en condiciones invernadero contra Foc TR4, incrementó significativamente altura y diámetro del pseudotallo frente al control (Damodaran et al., 2020), resultados similares a los obtenidos en este experimento.

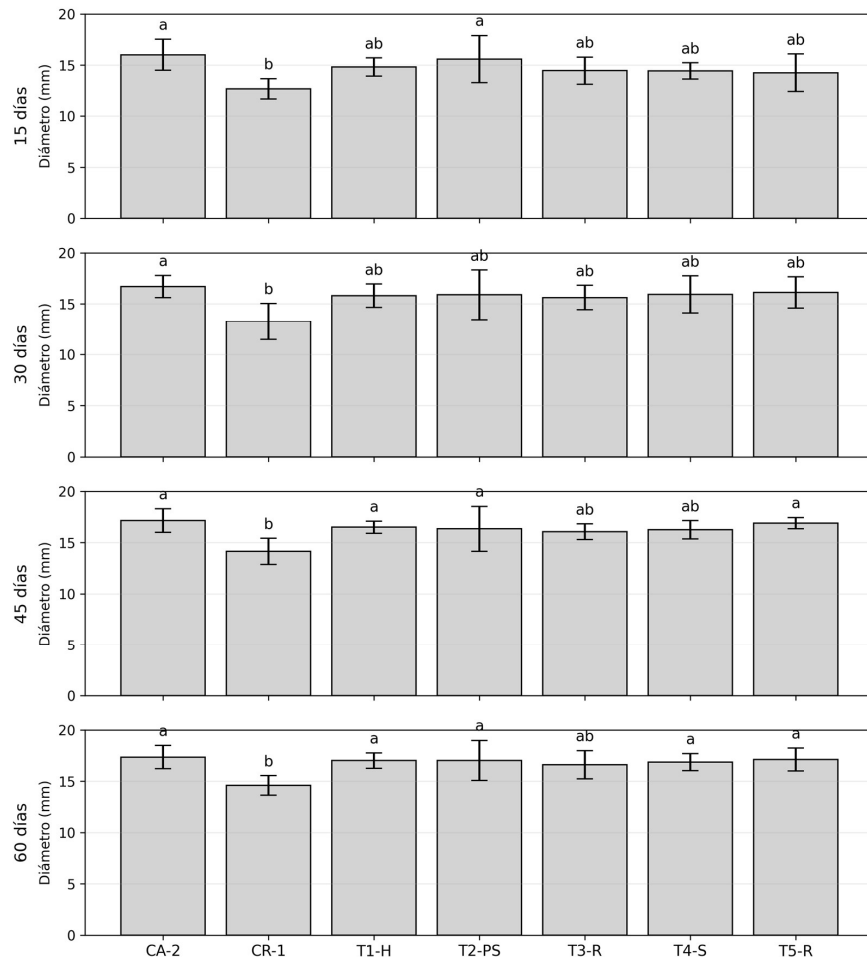


Figura 2. Diámetro del pseudotallo por tratamiento y tiempo bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Cada panel muestra el diámetro del pseudotallo a los 15, 30, 45 y 60 días después de la inoculación (medias marginales estimadas con sus IC95%). Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$) dentro de cada día. CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 2. Pseudostem diameter by treatment and time under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. Each panel shows the pseudostem diameter at 15, 30, 45, and 60 days after inoculation (estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs). Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$) within each day. CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

El número de hojas (60 DAI) mostró diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$). El control sin fitopatógeno (CA-2; T6) registró el mayor valor (9.00 hojas), mientras que el control inoculado con *R. solanacearum* (CR-1; T7) presentó 7.29 hojas, lo que equivale a una reducción de $\approx 19.0\%$ ($p < 0.05$). Los tratamientos con *Trichoderma* spp. T1-H, T3-R, T4-S y T5-R presentaron valores desde 8.00 a 8.14 hojas, sin diferir de CA-2 ($p > 0.05$), lo que sugiere una atenuación parcial de la pérdida foliar ($\approx +9.8\%$ a $+11.8\%$ respecto a CR-1). En contraste, T2-PS alcanzó 7.71 hojas, fue inferior a CA-2 ($p < 0.05$) y no difirió de CR-1 ($p > 0.05$) (Figura 3).

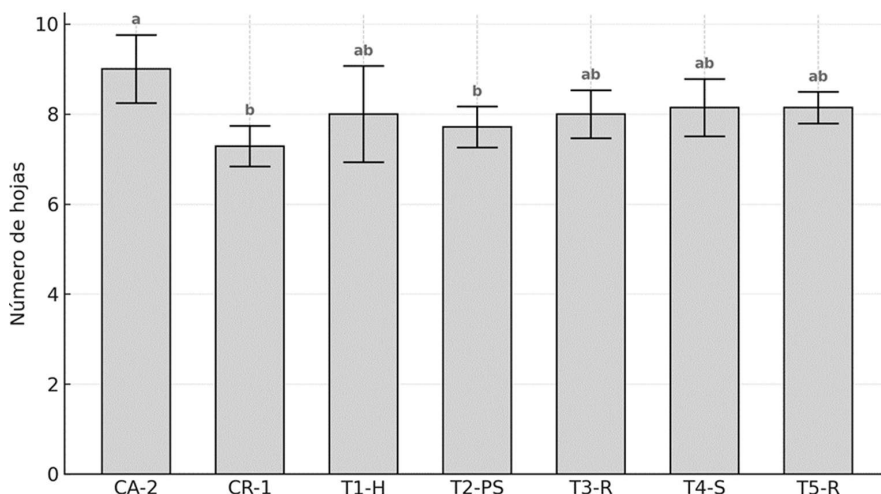


Figura 3. Número de hojas en plantas de banano bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran las medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 3. Number of leaves in banana plants inoculated with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treated with *Trichoderma* spp. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

El mayor número de hojas se obtuvo en el control agua (CA-2), se observó una reducción marcada con la inoculación de *R. solanacearum* (CR-1) y una recuperación parcial con los aislamientos de *Trichoderma* spp. (T1-H, T3-R, T4-S y T5-R). La marchitez bacteriana compromete la expansión y tasa de emisión foliar al limitar el suministro hídrico y de asimilados hacia el dosel, lo que se traduce en menor emisión de hojas funcionales (Chachar *et al.*, 2025). Por otro, varias cepas de *Trichoderma* spp. son capaces de sostener la producción foliar en plantas bajo inoculación con *R. solanacearum*, mediante vías de promoción de crecimiento y "priming" fisiológico. Se ha demostrado que metabolitos volátiles de *Trichoderma* spp., como 6-pentil-2H-pirán-2-ona (6-PP), reprograman el crecimiento de la parte aérea a través de la señalización auxínica y del componente EIN2 del eje etileno, favoreciendo un estado fisiológico que se asocia con mayor crecimiento vegetativo y, por extensión, con una mayor emisión/retención de hojas funcionales (Garnica-Vergara *et al.*, 2016; Alfiky y Weisskopf, 2021).

El control sin fitopatógeno (CA-2) presentó la mayor área foliar (499.86 cm²), mientras que el control inoculado con *R. solanacearum* (CR-1) registró el mínimo (349.17 cm²), lo que equivale a una reducción de 30.1% respecto a CA-2 ($p > 0.05$). Los tratamientos con *Trichoderma* spp. mostraron valores intermedios (439.24 - 447.48 cm²) y, por tanto, no difirieron estadísticamente ni de CA-2 ni de CR-1 ($p > 0.05$). No obstante, en términos relativos, estos tratamientos incrementaron el área foliar entre 25 y 28% respecto al control con el fitopatógeno (CR-1) (Figura 4A).

En el área radicular, el tratamiento con agua (CA-2) alcanzó 274.66 cm², mientras que el tratamiento con el fitopatógeno (CR-1) disminuyó a 179.04 cm² (-34.8%). Entre los tratamientos con *Trichoderma* spp., T5-R presentó el mayor valor (260.10 cm²), fue superior a CR-1 ($p < 0.05$) y no difirió de CA-2 ($p > 0.05$), con un incremento de 45.3% respecto al control infectado. Los tratamientos T1-H, T2-PS, T3-R y T4-S no presentaron diferencias estadísticas frente a los controles ($p > 0.05$), no obstante, sus medias fueron entre ~26 y ~28% mayores que el control infectado (Figura 4B).

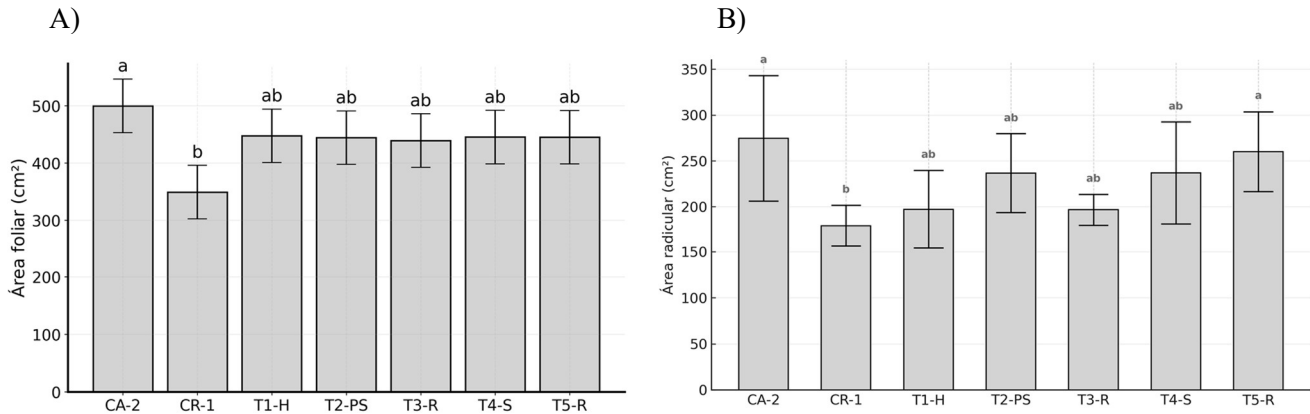


Figura 4. Área foliar (A) y radicular (B) de plantas de banana bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 4. Leaf area (A) and root area (B) of banana plants inoculated with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treated with *Trichoderma* spp. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

La inoculación con *R. solanacearum* redujo el área foliar y el área radicular, estos efectos pueden estar ocasionados por la colonización del xilema y la acumulación de exopolisacáridos que disminuyen la conductividad hidráulica, limitan el potencial hídrico foliar y restringen la expansión laminar y la asimilación de carbono (Lowe-Power *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2025). Los tratamientos con *Trichoderma* spp. atenuaron el daño, con un efecto más consistente en el sistema radicular. El aislamiento T5-R igualó al control agua (CA-2) en el área radicular y superó al control *R. solanacearum*, lo que sugiere una mayor ramificación y superficie de absorción, de la captación de agua y nutrientes. La ausencia de diferencias estadísticas en área foliar frente al control sano, pese a la tendencia de mejora con *Trichoderma* spp., es coherente con una reducción de la conductividad hidráulica del xilema por oclusión bacteriana, lo que limita el potencial hídrico foliar y restringe la expansión de la lámina y la asimilación de carbono (Ingel *et al.*, 2022). Además, la expansión de la lámina foliar, un proceso sumidero altamente sensible al estado hídrico, puede presentar un desfase temporal respecto de la recuperación funcional del sistema radicular (Tardieu, Parent, Caldeira y Welcker, 2014), mientras que los costos de la defensa inducida suponen reasignación de recursos que restringe el crecimiento foliar (Huot, Yao, Montgomery y He, 2014).

En la biomasa fresca por órgano, el control inoculado con *R. solanacearum* (CR-1) registró los valores más bajos en hoja, pseudotallo y raíz (13.6; 21.8 y 41.0 g, respectivamente), mientras que el control agua (CA-2) alcanzó los mayores promedios (18.8; 33.0 y 68.6 g). Esto representa reducciones de 27.7% (hoja), 33.9% (pseudotallo) y 40.2% (raíz) en CR-1 respecto a CA-2, evidenciando el efecto depresivo del fitopatógeno sobre la acumulación de biomasa. Los tratamientos con *Trichoderma* spp. aunque no difirieron estadísticamente de los controles ($p > 0.05$), tendieron a incrementar la biomasa frente a CR-1: +17.6–28.1% en hoja (16.0–17.4 g), +15.1–46.0% en pseudotallo (25.1–31.8 g) y +20.6–54.7% en raíz (49.4–63.4 g). Los resultados confirman la reducción de biomasa asociada a la marchitez bacteriana y sugieren una atenuación parcial del daño mediante *Trichoderma* spp. (Figura 5).

En términos fisiológicos, la reducción de la biomasa fresca refleja tanto deshidratación tisular como menor producción de asimilados, mientras que la biomasa seca captura la contracción del crecimiento estructural por restricción fotosintética y mayor coste respiratorio por estrés (Chaves, Flexas y Pinheiro, 2009; Munns *et al.*, 2020). Estos efectos están relacionados con la marchitez bacteriana descrita para solanáceas y otros hospedantes, donde la oclusión del xilema y el marchitamiento reducen fotosíntesis y crecimiento total de la planta (Zeist *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2025).

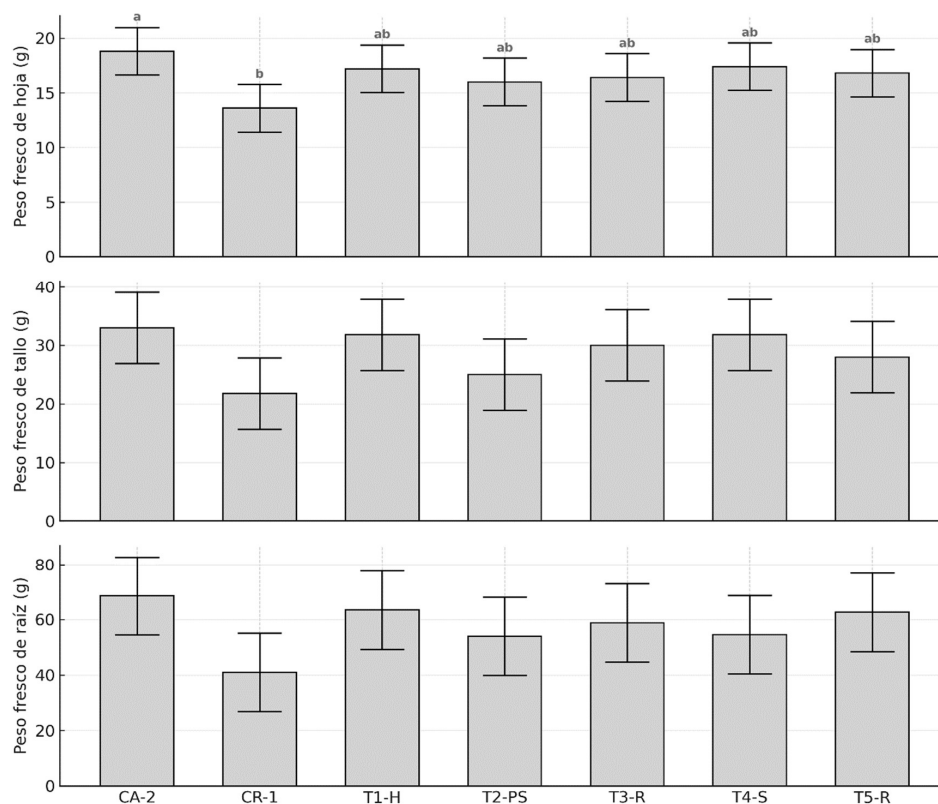


Figura 5. Biomasa fresca por órgano bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$), cuando no aparecen letras, no se detectaron diferencias significativas. CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 5. Fresh biomass per organ under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$), when no letters appear, no significant differences were detected. CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

Aunque ninguno de los cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. difirió estadísticamente de los controles en nuestros datos, la tendencia a mayores biomasa fresca y seca respecto al fitopatógeno (CR-1) y la aproximación al control agua (CA-2) es consistente con el modo de acción multisitio de *Trichoderma* spp., que incluye promoción del crecimiento, mejora del estado antioxidante, incremento de la exploración radicular y optimización de la adquisición de nutrientes mediante solubilización de fosfatos y movilización de micronutrientes (p. ej.: Fe vía sideróforos) (Altomare, Norvell, Björkman, & Harman, 1999; Sood et al., 2020). Asimismo, se observa atenuación del estrés oxidativo y del daño a membranas, con menos costos energéticos de mantenimiento (Shoresh, Harman y Mastouri, 2010; Ahmad et al., 2015); y conservación de pigmentos y de la eficiencia fotoquímica que sostiene la asimilación de carbono y en consecuencia, la acumulación de materia seca (Vukelić et al., 2021; Song, Wang, Xu, Zhou y Mu, 2023).

En biomasa seca, el control agua (CA-2) registró los valores más altos en hoja y pseudotallo (3.6 y 4.2 g), mientras que el control infectado (CR-1) presentó los mínimos (1.6 y 2.4 g), evidenciando disminuciones de ~55.6 y ~42.9%, respectivamente. Los tratamientos con *Trichoderma* spp. presentaron incrementos de ~37.5-100%

en hoja y ~25.0–66.7% en pseudotallo respecto a CR-1; sin embargo, no se detectaron diferencias estadísticas frente a ambos controles ($p > 0.05$). En raíz, aunque CA-2 mostró el mayor promedio (12.4 g) y CR-1 el menor (7.4 g), las diferencias no fueron significativas ($p > 0.05$); aun así, los tratamientos con *Trichoderma* spp. tendieron a aumentar la biomasa seca radicular (8.0–11.0 g; +8.1–48.6% vs. CR-1), sugiriendo un efecto de recuperación parcial del crecimiento estructural bajo infección (Figura 6).

El efecto de tratamiento fue significativo tanto para la biomasa total fresca como para la biomasa total seca ($p < 0.05$). En ambas variables, el control agua (CA-2) presentó los valores más altos y superó al control infectado con *R. solanacearum* (CR-1; $p < 0.05$) en un 36.5 a 37.1%. Los tratamientos con *Trichoderma* spp. (T1-H, T2-PS, T3-R, T4-S y T5-R) no difirieron estadísticamente de los controles ($p > 0.05$), aunque incrementaron la biomasa fresca y seca total entre un 24 a 49% respecto al fitopatógeno (CR-1). *Trichoderma* spp. no restableció completamente la biomasa total al nivel del control agua, pero tampoco evidenció una reducción respecto del control con *R. solanacearum* (Figura 7).

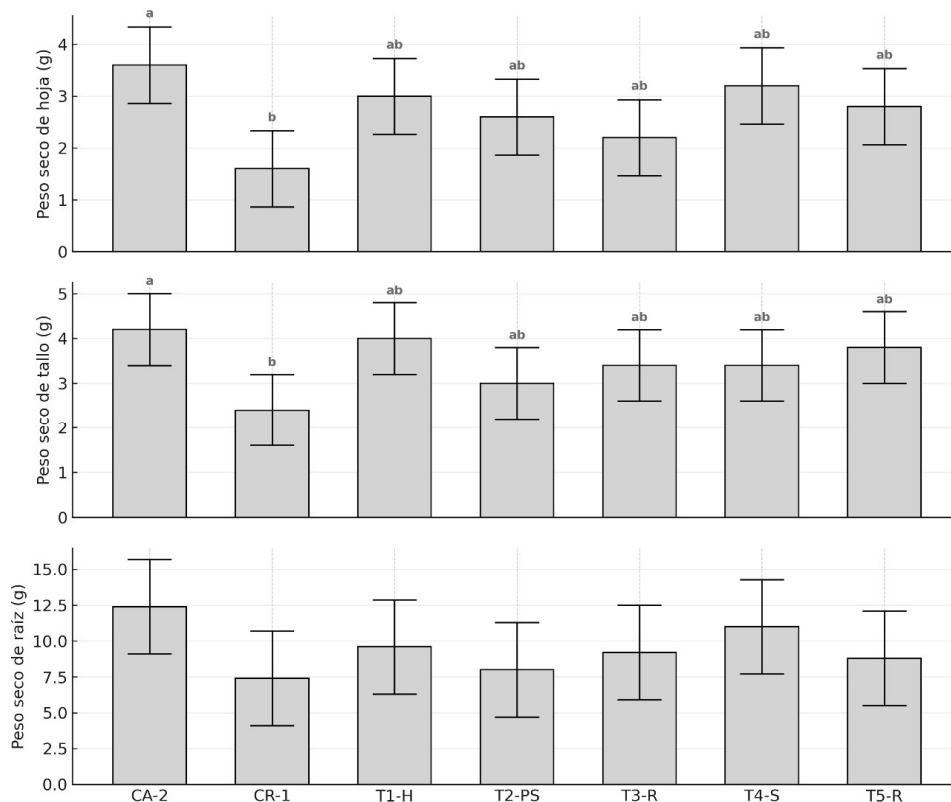


Figura 6. Biomasa seca por órgano bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$), cuando no aparecen letras, no se detectaron diferencias significativas. CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 6. Dry biomass per organ under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$), when no letters appear, no significant differences were detected. CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

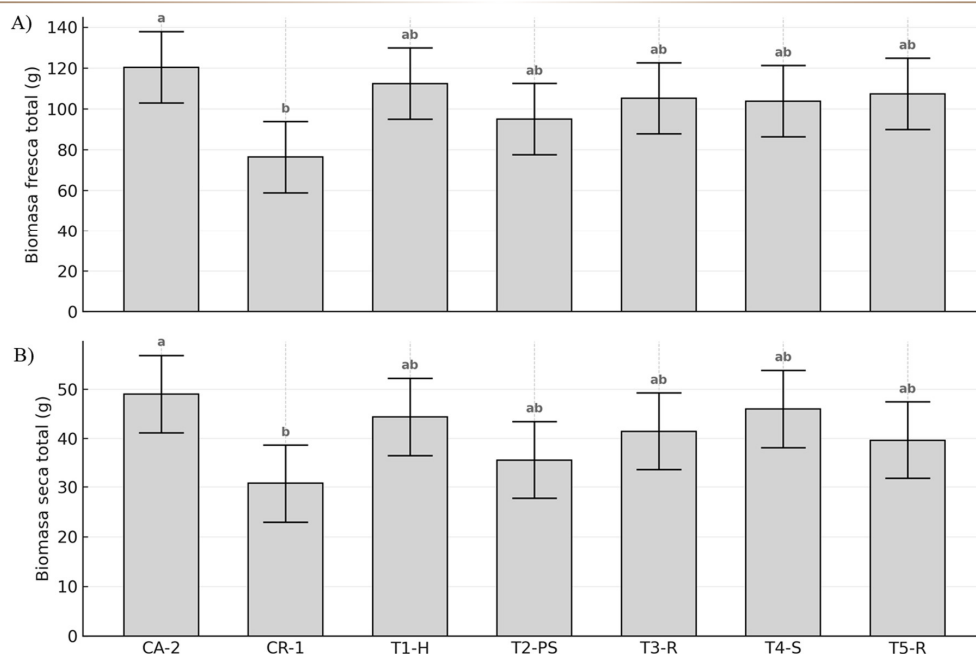


Figura 7. Biomasa fresca (A) y seca total (B) de plantas de banano bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 7. Fresh biomass (A) and total dry biomass (B) of banana plants under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$). CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

En el cultivo de tomate la inoculación con *Trichoderma* spp. y el uso de sus filtrados de cultivo han incrementado la biomasa aérea y radical en condiciones de invernadero; adicionalmente, compuestos volátiles como 6-pentil-2H-pirán-2-ona (6-PP) promueve el aumento de biomasa vía señalización hormonal, reforzando el efecto bioestimulante observado en plántulas como, mayores pesos fresco/seco y crecimiento vegetativo (Jaiswal, Mengiste, Myers, Egel y Hoagland, 2020; Imran, Abo-Elyousr, Mousa y Saad, 2023). En banano *T. koningiopsis* Tk905 incrementó de manera significativa el peso fresco de raíz y brote y la altura de planta bajo maceta/invernadero, otras especies como *T. longibrachiatum* actúan como biestimulantes del crecimiento en plántulas micropropagadas, demostrando el potencial de *Trichoderma* spp. para mejorar la acumulación de biomasa en este cultivo (Sanó et al., 2022; Luo et al., 2023).

Respecto a la incidencia de la enfermedad, el tratamiento control infectado CR-1 registró 100% de plantas enfermas. Los tratamientos T2-PS y T3_R de *Trichoderma* spp. también presentaron 100% de incidencia de la enfermedad. En el caso de los tratamientos T1-H, T4-S y T5-R mostraron incidencia de 57.1, 71.4 y 71.4% respectivamente, reduciendo la incidencia de la enfermedad desde un 28 a 43%. Sin embargo, ninguno de los tratamientos difirió estadísticamente de CR-1 ($p > 0.05$) (Figura 8).

A los 60 DAI, la incidencia se mantuvo en 100% para CR-1 y para dos tratamientos (T2-PS, T3-R), mientras que T1-H, T4-S y T5-R mostraron reducciones de 28-43%, aunque sin diferencias estadísticas frente al control infectado (CR-1). Este patrón es coherente con la naturaleza de la incidencia, aun cuando un tratamiento retrase la infección o amortigüe la progresión, cualquier planta que cruce el umbral sintomático hasta el momento de evaluación se contabiliza como "enferma". Por ello, los efectos del tratamiento suelen detectarse con mayor sensibilidad en métricas continuas, como la severidad y el (r)AUDPC, que en la incidencia puntual al final del periodo.

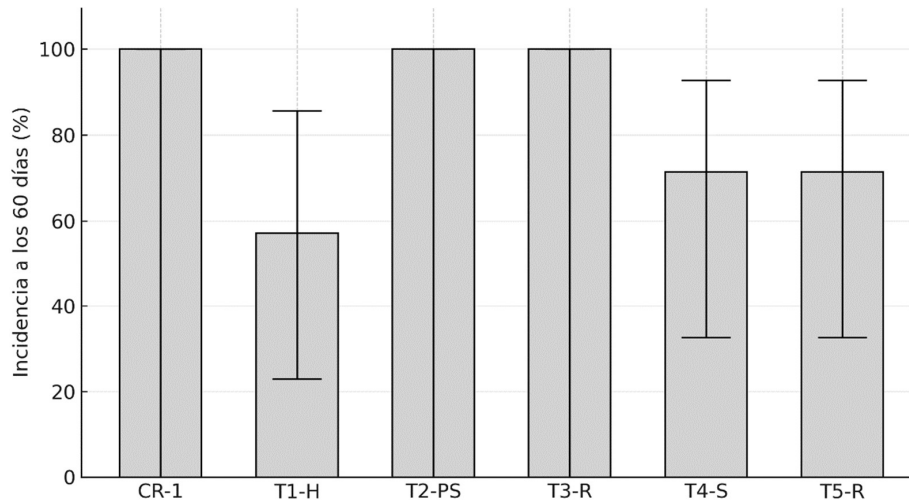


Figura 8. Incidencia de marchitez bacteriana bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Las barras muestran las medias marginales estimadas (EMMs) del modelo binomial (logit) con sus IC95%. CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 8. Incidence of bacterial wilt under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. The bars show the estimated marginal means (EMMs) of the binomial (logit) model with 95% CIs. CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

La severidad aumentó con el tiempo en todos los tratamientos, pero con trayectorias diferenciadas (interacción Tratamiento×Día; Figura 9). A los 15 días no se detectaron diferencias ($p > 0.05$). A los 30 días, el control con el fitopatógeno (CR-1) registró la mayor severidad (60.71%), mientras que T5-R (14.29%) y T4-S (17.86%) fueron significativamente menores que CR-1 ($p < 0.05$); T1-H, T2-PS y T3-R presentaron valores de 30–45%, sin diferencias significativas con el fitopatógeno (CR-1). A los 45 días, CR-1 alcanzó 89.29%, superando a todos los tratamientos con *Trichoderma* spp.; T5-R (25%) y T4-S (35.71%) presentaron las menores severidades (ambos $< CR-1$; $p < 0.05$). A los 60 días, CR-1 presentó la mayor severidad con un 92.86%, sin embargo, no mostró diferencias con los tratamientos T2-PS y T3-R ($p > 0.05$). El tratamiento T5-R mostró la menor severidad con un 35.71%, sin diferencias estadísticas con los tratamientos T1-H y T4-S. En todos los momentos de evaluación el fitopatógeno mostró la mayor severidad de la enfermedad. En términos de reducción respecto a *R. solanacearum* (CR-1), T5-R disminuyó la severidad aproximadamente 80, 70 y 60% a los 30, 45 y 60 días, respectivamente, T4-S lo hizo en un 65, 55 y 45% en las mismas fechas.

La severidad de la enfermedad mostró un patrón coherente con la patogénesis vascular de *R. solanacearum* (Figura 9): la bacteria coloniza el xilema, produce exopolisacáridos y otros factores de virulencia que progresivamente comprometen la conductividad hidráulica, por lo que las curvas de severidad se separan con el tiempo y el control infectado mantiene los valores más altos (CR-1) (Peeters, Guidot, Vailleau y Valls, 2013). La menor severidad observada con T5-R, T4-S y T3-R entre 30–60 DAI es coherente con el modo de acción de *Trichoderma* spp. Estas cepas colonizan con rapidez la rizosfera y tejidos radiculares (endofitismo), donde compiten por nicho y hierro (p. ej.: mediante sideróforos) (Syed *et al.*, 2023; Cui *et al.*, 2025), forman biopelículas y secretan metabolitos/enzimas que limitan el establecimiento del fitopatógeno (Islam *et al.*, 2023; Philip *et al.*, 2024); proteínas tipo swollenin facilitan además el acomodo en pared celular y la persistencia en la raíz, condición necesaria para efectos sistémicos posteriores (Brotman, Briff, Viterbo y Chet, 2008; Hermosa, Viterbo, Chet y Monte, 2012).

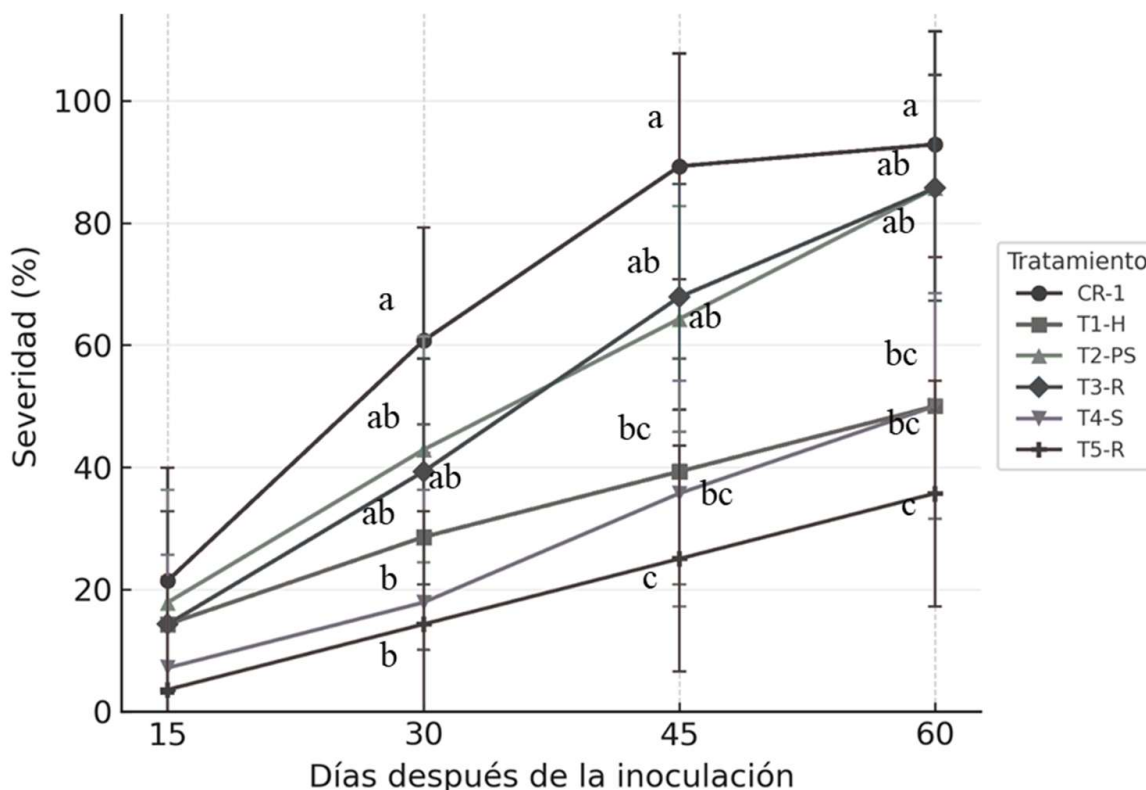


Figura 9. Severidad de la marchitez bacteriana en el tiempo bajo inoculación con *Ralstonia solanacearum* raza 2 y tratamientos con *Trichoderma* spp. Puntos y líneas muestran las medias marginales estimadas (EMMs) del modelo lineal mixto con sus IC95%. Letras distintas dentro de cada día indican diferencias entre tratamientos (Tukey, $\alpha = 0.05$), cuando no aparecen letras, no se detectaron diferencias significativas. CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 9. Severity of bacterial wilt over time under inoculation with *Ralstonia solanacearum* race 2 and treatments with *Trichoderma* spp. Points and lines show the estimated marginal means (EMMs) of the mixed linear model with 95% CIs. Different letters within each day indicate differences between treatments (Tukey, $\alpha = 0.05$); when no letters appear, no significant differences were detected. CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

En concordancia con lo observado en nuestro experimento para T5-R y T4-S (menor pendiente de progreso y menor nivel de severidad), estudios en solanáceas reportan efectos similares, en tomate, la aplicación de *T. asperellum* redujo significativamente la marchitez bacteriana causada por *R. solanacearum*, con descensos sustanciales de incidencia/severidad respecto al control (Konappa, Krishnamurthy, Siddaiah, Ramachandrapa y Chowdappa, 2018). En condiciones de invernadero, los metabolitos de *T. harzianum* disminuyeron el AUDPC y el nivel final de la enfermedad, confirmando un efecto sostenido sobre la curva temporal y el daño terminal (Yan y Khan, 2021). Estas evidencias respaldan que ciertas formulaciones/cepas de *Trichoderma* pueden reducir la progresión de la enfermedad y amortiguar la expresión de síntomas bajo marchitez bacteriana.

El rAUDPC difirió entre tratamientos (ANOVA, $p < 0.05$). El control con fitopatógeno (CR-1) presentó el mayor progreso de la enfermedad (69.05%). Los tratamientos *Trichoderma* spp. T1-H (33.33%), T4-S (27.38%) y T5-R (19.64%) presentaron la menor rAUDPC, con diferencias significativas con el fitopatógeno (CR-1), redujeron el rAUDPC respecto al control en 71.6, 60.3 y 51.7%, respectivamente ($p < 0.05$). T2-PS (52.98%) y T3-R (52.38%) no presentaron diferencias estadísticas del control ($p > 0.05$), aunque tendieron a menores rAUDPC. En resumen, T5-R exhibió la menor intensidad temporal de la marchitez (Figura 10).

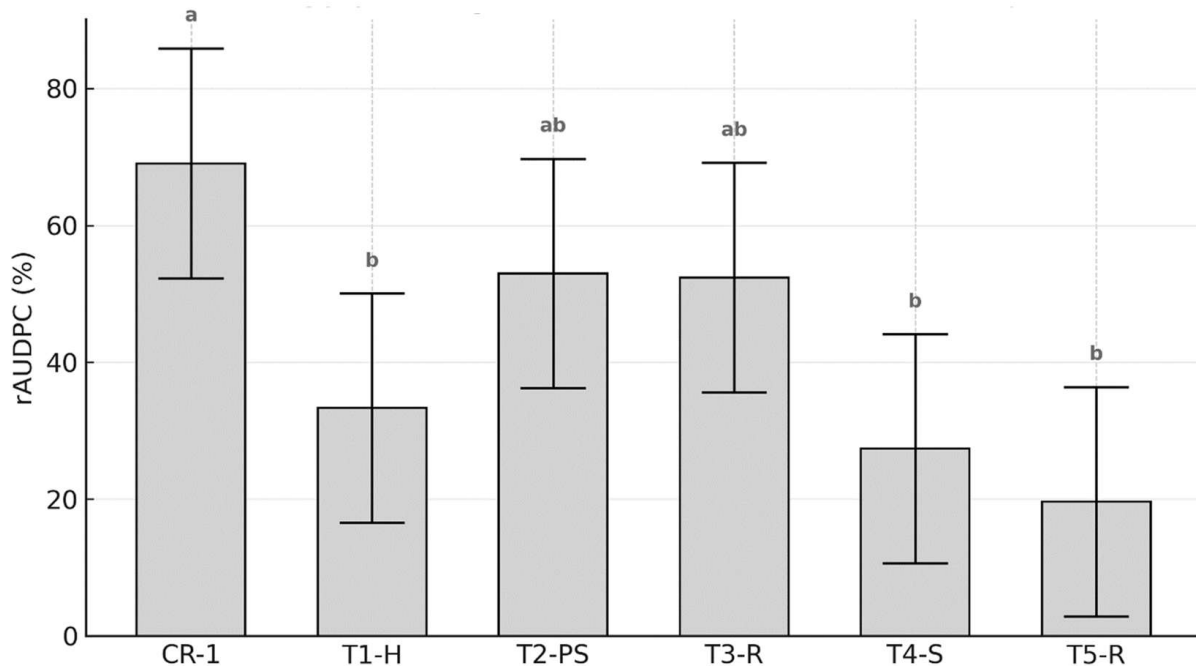


Figura 10. Área bajo la curva de progreso de la enfermedad normalizada (rAUDPC) por tratamiento. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. Letras diferentes sobre las barras (a, b) indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0.05$). T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 10. Area under the normalized disease progression curve (rAUDPC) by treatment. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. Different letters above the bars (a, b) indicate significant differences according to Tukey ($\alpha = 0.05$), when no letters appear, no significant differences were detected. T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

El patrón observado para rAUDPC con reducciones en T5-R (~72%), T4-S (~60%) y T1-H (~52%) frente al control con fitopatógeno, indica una reducción de la enfermedad lo largo del tiempo, es decir, una disminución de la tasa aparente de infección, dado que rAUDPC integra simultáneamente pendiente y meseta de la curva de progreso de la enfermedad. Este tipo de interpretación es consistente con el uso epidemiológico del (r)AUDPC como medida compuesta del desarrollo temporal del patosistema (Knudsen, Kim, Bae y Dandurand, 2015).

La reducción de rAUDPC está relacionado con la capacidad de *Trichoderma* spp. para colonizar la rizosfera y el interior de la raíz, competir por espacio y recursos (Oszust, Cybulska y Frąc, 2020; Dutta *et al.*, 2023), y activar resistencia sistémica inducida (ISR) principalmente a través de las vías de jasmonato/etileno y rutas fenilpropanoides (Singh *et al.*, 2019; Aamir *et al.*, 2023), con depósito de callosa y acumulación de proteínas relacionadas con patogénesis PR (Nawrocka, Mafolepsza, Szymczak y Szczech, 2018; Alfiky y Weisskopf, 2021); estos procesos tienden a retrasar la colonización vascular efectiva de *R. solanacearum* y, por ende, a disminuir la pendiente de la curva de enfermedad.

En términos de eficacia relativa frente al control con fitopatógeno, los tratamientos de *Trichoderma* spp. T5-R presentó la mayor eficiencia, alcanzando valores de 79.73%, seguido por T4-S con un 63.51% y T1-H 50%. Los tratamientos T2-PS (31.08%) y T3-R (25.68%) presentaron los valores más bajos. No obstante, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). T5-R y T4-S concentraron la mayor reducción media de la enfermedad según Abbott, mientras que T2-PS y T3-R mostraron una menor eficiencia en el control de la enfermedad (Figura 11).

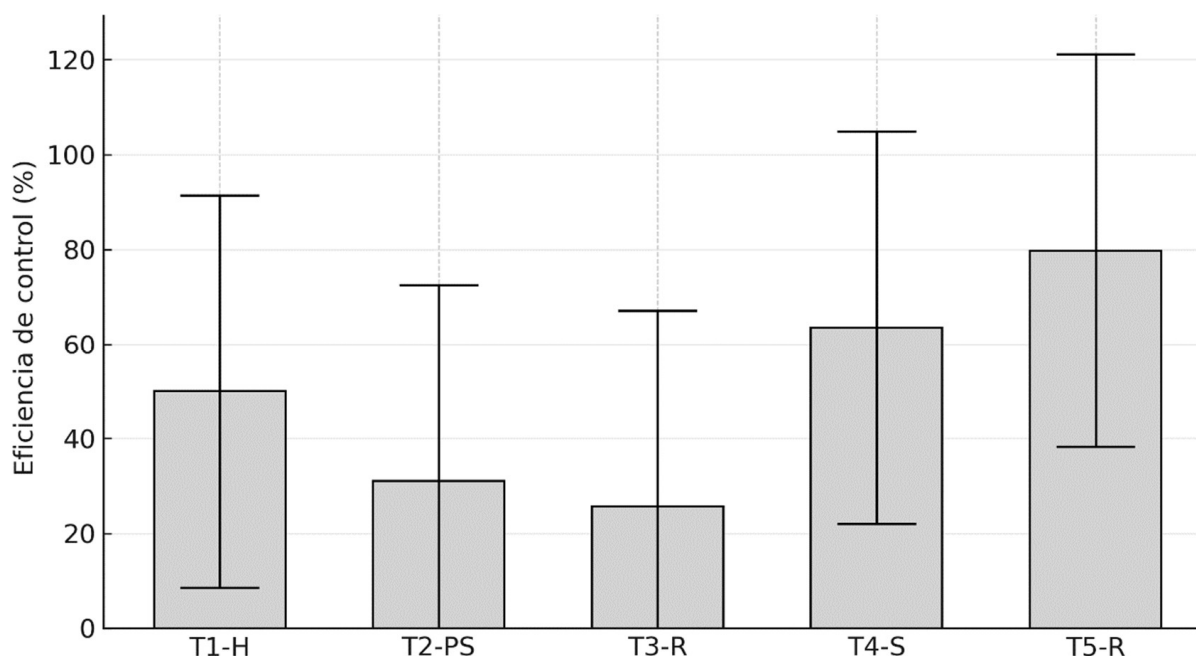


Figura 11. Eficiencia de control (Abbott) de los tratamientos con *Trichoderma* spp. frente a *Ralstonia solanacearum* raza 2. Las barras muestran medias marginales estimadas (EMMs) con sus IC95%. No se detectaron diferencias entre tratamientos (ANOVA, $p > 0.05$). CA-2 (control con agua), CR-1 (control con *Ralstonia solanacearum* raza 2) y cinco tratamientos con *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* raza 2: T1-H (*T. asperellum*, aislado de hoja de plátano, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, aislado de pseudotallo de plátano, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, aislado de raíz de abacá, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, aislado de suelo de abacá, Santo Domingo) y T5-R (*T. asperellum*, aislado de raíz de plátano, Santo Domingo).

Figure 11. Control efficiency (Abbott) of treatments with *Trichoderma* spp. against *Ralstonia solanacearum* race 2. The bars show estimated marginal means (EMMs) with 95% CIs. No differences were detected between treatments (ANOVA, $p > 0.05$). CA-2 (control with water), CR-1 (control with *Ralstonia solanacearum* race 2) and five treatments with *Trichoderma* spp. + *Ralstonia solanacearum* race 2: T1-H (*T. asperellum*, isolated from banana leaf, Manabí), T2-PS (*T. asperellum*, isolated from banana pseudostem, Santo Domingo), T3-R (*T. harzianum*, isolated from abaca root, Manabí), T4-S (*T. harzianum*, isolated from abaca soil, Santo Domingo) and T5-R (*T. asperellum*, isolated from banana root, Santo Domingo).

CONCLUSIONES

Los aislamientos de *Trichoderma* spp. (*T. asperellum*, raíz) y (*T. harzianum*, suelo) redujeron el progreso temporal de la enfermedad (menor rAUDPC) y mantuvieron el crecimiento (altura y diámetro del pseudotallo) sin evidenciar penalizaciones de vigor. Sin embargo, la incidencia final fue menos sensible para capturar beneficios que las métricas continuas (severidad en el tiempo, rAUDPC). Los resultados demostraron el efecto de los aislamiento-dependiente, por lo que la selección de cepas debe priorizar aquellas con modo de acción multifactorial (biocontrol + bioestimulación) y reproducibilidad. Los tratamientos (*T. asperellum*, raíz) y (*T. harzianum*, suelo) se perfilan como candidatos para integrar un manejo integrado de marchitez bacteriana que priorice colonización temprana y bioseguridad, sin comprometer el crecimiento. No obstante, se requieren validaciones a campo, curvas dosis-respuesta y evaluaciones de compatibilidad con prácticas habituales y análisis de costo-beneficio para respaldar su utilización a escala productiva.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.A.T.R. y C.M.M.R.; Metodología: J.A.T.R., K.R.M.M. y K.N.F.L.; Software: K.M.L.C. y P.I.T.Y.; Validación: J.A.T.R., P.M.R.A. y P.I.T.Y.; Análisis formal: K.R.M.M. y K.N.F.L.; Investigación: P.M.R.A. y C.M.M.R.; Recursos: P.I.T.Y.; Curación de datos: K.R.M.M. y K.N.F.L.; Escritura – preparación del borrador original: J.A.T.R. y C.M.M.R.; Escritura – revisión y edición: K.R.M.M., P.M.R.A. y P.I.T.Y.; Visualización: J.A.T.R. y K.N.F.L.; Supervisión: K.M.L.C.; Administración del proyecto: J.A.T.R. y P.I.T.Y.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), a la dirección de investigación de la UTEQ por su apoyo brindado en todo momento y a los Fondo Concursable para la Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT). Un agradecimiento especial a todo el equipo de banano del INIAP por el apoyo brindado en esta investigación y al proyecto DAPME, del programa de Banano, Plátano y otras Musáceas del INIAP.

LITERATURA CITADA

- Aamir, M., Shanmugam, V., Dubey, M. K., Husain, F. M., Adil, M., Ansari, W. A., ... & Sah, P. (2023). Transcriptomic characterization of *Trichoderma harzianum* T34 primed tomato plants: assessment of biocontrol agent induced host specific gene expression and plant growth promotion. *BMC Plant Biology*, 23(1), 552. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04502-6>
- Abbott, W. S. (1925). A Method of Computing the Effectiveness of an Insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Adomako, J., Osei, M. K., Prempeh, R. N. A., Osei-Bonsu, I., Gyau, J., Ofori, P., ... Cho, M.-C. (2024). Identification of *Ralstonia solanacearum* resistant solanum plants as potential rootstock to manage bacterial wilt disease in tomato production. *Technology in Horticulture*, 4(1), 1-7. <https://doi.org/10.48130/tihort-0024-0017>
- Ahmad, P., Hashem, A., Abd-Allah, E. F., Alqarawi, A. A., John, R., Egamberdieva, D., & Gucel, S. (2015). Role of *Trichoderma harzianum* in mitigating NaCl stress in Indian mustard (*Brassica juncea* L) through antioxidative defense system. *Frontiers in Plant Science*, 6, 868.
- Alfiky, A., & Weisskopf, L. (2021). Deciphering Trichoderma-Plant-Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *Journal of Fungi*, 7(1), 61. <https://doi.org/10.3390/jof7010061>
- Altomare, C., Norvell, W. A., Björkman, T., & Harman, G. E. (1999). Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *trichoderma harzianum* rifai 1295-22. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2926-2933. <https://doi.org/10.1128/aem.65.7.2926-2933.1999>
- Álvarez, B., López, M. M., & Biosca, E. G. (2008). Survival strategies and pathogenicity of *Ralstonia solanacearum* phylotype II subjected to prolonged starvation in environmental water microcosms. *Microbiology*, 154(11), 3590-3598. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2008/019448-0>
- Álvarez, E., Pantoja, A., Ceballos, G., & Gañán, L. (2013). *Manejo del Moko en América Latina y el Caribe*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Bakar, R. A. H., Badrun, R., Ahmad, K., & Abu-Bakar, N. (2018). Symptomatology and range of the blood disease bacterium A2 HR MARDI strain (*Ralstonia solanacearum* subsp. *celebensis*) on selected hosts. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 11(9), 71-77.
- Baker, B. P., Green, T. A., & Loker, A. J. (2020). Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems. *Biological Control*, 140, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104095>
- Blomme, G., Dita, M., Jacobsen, K. S., Pérez Vicente, L., Molina, A., Ocimati, W., ... & Prior, P. (2017). Bacterial Diseases of Bananas and Enset: Current State of Knowledge and Integrated Approaches Toward Sustainable Management. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-25. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01290>
- Brotman, Y., Briff, E., Viterbo, A., & Chet, I. (2008). Role of Swollenin, an Expansin-Like Protein from *Trichoderma*, in Plant Root Colonization. *Plant Physiology*, 147(2), 779-789. <https://doi.org/10.1104/pp.108.116293>
- Chachar, Z., Xue, X., Fang, J., Chen, M., Jiarui, C., Chen, W., ... Qi, Y. (2025). Key mechanisms of plant-Ralstonia solanacearum interaction in bacterial wilt pathogenesis. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1521422>
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 149(3), 1579-1592. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130369>
- Cui, H., Cheng, Q., Jing, T., Chen, Y., Li, X., Zhang, M., ... & Xie, J. (2025). *Trichoderma virens* XZ11-1 producing siderophores inhibits the infection of *Fusarium oxysporum* and promotes plant growth in banana plants. *Microbial Cell Factories*, 24(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02626-4>
- Damodaran, T., Rajan, S., Muthukumar, M., Gopal, R., Yadav, K., Kumar, S., ... & Jha, S. K. (2020). Biological management of banana *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 using antagonistic fungal isolate CSR-T-3 (*Trichoderma reesei*). *Frontiers in Microbiology*, 11, 595845. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.595845>
- Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A., & Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>
- Du, C., Yang, D., Jiang, S., Zhang, J., Ye, Y., Pan, L., & Fu, G. (2024). Biocontrol agents inhibit banana *Fusarium* wilt and alter the rooted soil bacterial community in the field. *Journal of Fungi*, 10(11), 771. <https://doi.org/10.3390/jof10110771>
- Dutta, P., Mahanta, M., Singh, S. B., Thakuria, D., Deb, L., Kumari, A., ... & Pandey, A. K. (2023). Molecular interaction between plants and *Trichoderma* species against soil-borne plant pathogens. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1145715. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1145715>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2022). *Banano: Análisis del mercado 2021*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.
- Garnica-Vergara, A., Barrera-Ortiz, S., Muñoz-Parra, E., Raya-González, J., Méndez-Bravo, A., Macías-Rodríguez, L., ... & López-Bucio, J. (2016). The volatile 6-pentyl-2H-pyran-2-one from *Trichoderma atroviride* regulates *Arabidopsis thaliana* root morphogenesis via auxin signaling and ETHYLENE INSENSITIVE 2 functioning. *New Phytologist*, 209(4), 1496-1512.
- Genin, S., & Denny, T. P. (2012). Pathogenomics of the *Ralstonia solanacearum* Species Complex. *Annual Review of Phytopathology*, 50(1), 67-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-173000>
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I., & Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17-25. <https://doi.org/10.1099/mic.0.052274-0>
- Huot, B., Yao, J., Montgomery, B. L., & He, S. Y. (2014). Growth-Defense Tradeoffs in Plants: A Balancing Act to Optimize Fitness. *Molecular Plant*, 7(8), 1267-1287. <https://doi.org/10.1093/mp/ssu049>
- Imran, M., Abo-Elyousr, K. A. M., Mousa, M. A. A., & Saad, M. M. (2023). Use of *Trichoderma* culture filtrates as a sustainable approach to mitigate early blight disease of tomato and their influence on plant biomarkers and antioxidants production. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1192818. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1192818>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2021). *Registros históricos de la estación meteorológica Pichilingue*. Quevedo, Los Ríos, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2025). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC): Presentación de resultados. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Ingel, B., Caldwell, D., Duong, F., Parkinson, D. Y., McCulloh, K. A., Iyer-Pascuzzi, A. S., ... & Lowe-Power, T. M. (2022). Revisiting the source of wilt symptoms: X-ray microcomputed tomography provides direct evidence that *Ralstonia* biomass clogs xylem vessels. *PhytoFrontiers*, 2(1), 41-51. <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-06-21-0041-R>
- Islam, M. R., Chowdhury, R., Roy, A. S., Islam, M. N., Mita, M. M., Bashar, S., ... & Latif, M. A. (2023). Native *Trichoderma* induced the defense-related enzymes and genes in rice against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (Xoo). *Plants*, 12(9), 1864. <https://doi.org/10.3390/plants12091864>
- Jaiswal, A. K., Mengiste, T. D., Myers, J. R., Egel, D. S., & Hoagland, L. A. (2020). Tomato domestication attenuated responsiveness to a beneficial soil microbe for plant growth promotion and induction of systemic resistance to foliar pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 11, 604566. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.604566>
- Knudsen, G. R., Kim, T. G., Bae, Y. S., & Dandurand, L. (2015). Use of quantitative real-time pcr to unravel ecological complexity in a biological control system. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(04), 237-244. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.64023>
- Konappa, N., Krishnamurthy, S., Siddaiah, C. N., Ramachandrapa, N. S., & Chowdappa, S. (2018). Evaluation of biological efficacy of *Trichoderma asperellum* against tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0069-5>
- Lowe-Power, T. M., Khokhani, D., & Allen, C. (2018). How *Ralstonia solanacearum* exploits and thrives in the flowing plant xylem environment. *Trends in Microbiology*, 26(11), 929-942. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2018.06.002>
- Luo, M., Chen, Y., Huang, Q., Huang, Z., Song, H., & Dong, Z. (2023). *Trichoderma koningiopsis* Tk905: An efficient biocontrol, induced resistance agent against banana *Fusarium* wilt disease and a potential plant-growth-promoting fungus. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1301062>
- Martínez, J. E. A., Guerrero, J. N. Q., Carrillo, J. E. C., & Unda, S. A. B. (2024). Efectos de bioestimulantes en el comportamiento agronómico del cultivo de banano. *Polo del Conocimiento*, 9(3), 439-453.
- Martínez, Y., Ribera, J., Schwarze, F. W. M. R., & De France, K. (2023). Biotechnological development of *Trichoderma*-based formulations for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), 5595-5612. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12687-x>
- Mukherjee, A. K., Mohapatra, N. K., Rao, A. V. S., & Nayak, P. (2005). Effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-blasting resistance in rice. *The Journal of Agricultural Science*, 143(5), 385-393. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005551>
- Munns, R., Day, D. A., Fricke, W., Watt, M., Arsova, B., Barkla, B. J., ... & Tyerman, S. D. (2020). Energy costs of salt tolerance in crop plants. *New Phytologist*, 225(3), 1072-1090. <https://doi.org/10.1111/nph.15864>
- Nawrocka, J., Małolepsza, U., Szymczak, K., & Szczech, M. (2018). Involvement of metabolic components, volatile compounds, PR proteins, and mechanical strengthening in multilayer protection of cucumber plants against *Rhizoctonia solani* activated by *Trichoderma atroviride* TRS25. *Protoplasma*, 255(1), 359-373. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1157-1>
- Oszup, K., Cybulska, J., & Frac, M. (2020). How Do *Trichoderma* Genus Fungi Win a Nutritional Competition Battle against Soft Fruit Pathogens? A Report on Niche Overlap Nutritional Potentials. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(12), 4235. <https://doi.org/10.3390/ijms21124235>
- Peeters, N., Guidot, A., Vailleau, F., & Valls, M. (2013). *Ralstonia solanacearum*, a widespread bacterial plant pathogen in the post-genomic era. *Molecular Plant Pathology*, 14(7), 651-662. <https://doi.org/10.1111/mpp.12038>
- Philip, B., Behiry, S. I., Salem, M. Z., Amer, M. A., El-Samra, I. A., Abdelkhalek, A., & Heflish, A. (2024). *Trichoderma afroharzianum* TRI07 metabolites inhibit *Alternaria alternata* growth and induce tomato defense-related enzymes. *Scientific Reports*, 14(1), 1874. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52301-2>

- Pozo, M. I., Herrero, B., Martín-García, J., Santamaría, Ó., & Poveda, J. (2024). Evaluating potential side effects of *Trichoderma* as biocontrol agent: A two-edged sword? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 41, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100566>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing (Version 4.4.2)*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Sanó, L., de Oliveira, L. L. B., Leão, M. D. M., Dos Santos, J. E. D. Á., de Medeiros, S. C., Schneider, F., ... & da Silva, C. D. F. B. (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>
- Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M., Afridi, M. S., Mitra, D., Valencia-Cantero, E., & Macías-Rodríguez, L. (2024). *Trichoderma* and *Bacillus* multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: recent advances and future challenges. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1423980. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1423980>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Shoresh, M., Harman, G. E., & Mastouri, F. (2010). Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 21-43. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114450>
- Singh, U. B., Malviya, D., Singh, S., Kumar, M., Sahu, P. K., Singh, H. V., ... & Saxena, A. K. (2019). *Trichoderma harzianum*-and methyl jasmonate-induced resistance to *Bipolaris sorokiniana* through enhanced phenylpropanoid activities in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Microbiology*, 10, 1697. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01697>
- Song, M., Wang, X., Xu, H., Zhou, X., & Mu, C. (2023). Effect of *Trichoderma viride* on insoluble phosphorus absorption ability and growth of *Melilotus officinalis*. *Scientific Reports*, 13(1), 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39501-y>
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., ... & Sharma, A. (2020). *Trichoderma*: The "secrets" of a multitasking biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762. <https://doi.org/10.3390/plants9060762>
- Sorahinobar, M., Yusefieh, N., Rezaei, M., & Shahbazi, S. (2025). Multifaceted role of *Trichoderma harzianum* isolates in mitigating drought stress and promoting adaptive responses in barley cultivars. *Scientific Reports*, 15(1), 26552. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08922-2>
- Syed, A., Elgorban, A. M., Bahkali, A. H., Eswaramoorthy, R., Iqbal, R. K., & Danish, S. (2023). Metal-tolerant and siderophore producing *Pseudomonas fluorescence* and *Trichoderma* spp. improved the growth, biochemical features and yield attributes of chickpea by lowering Cd uptake. *Scientific Reports*, 13(1), 4471. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31330-3>
- Tardieu, F., Parent, B., Caldeira, C. F., & Welcker, C. (2014). Genetic and Physiological Controls of Growth under Water Deficit1. *Plant Physiology*, 164(4), 1628-1635. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233353>
- Torres-Rodríguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., Ramos, L. T. L., Gonzalo-Matute, L., Rueda-Puente, E. O., & Hernandez-Montiel, L. G. (2025). Chitosan as a postharvest alternative for the control of *Phytophthora capsici* in bell pepper fruits. *Sci*, 7(2), 37. <https://doi.org/10.3390/sci7020037>
- Vailleau, F., & Genin, S. (2023). *Ralstonia solanacearum*: an arsenal of virulence strategies and prospects for resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 61(1), 25-47. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-104551>
- Velásquez, A. C., Castroverde, C. D. M., & He, S. Y. (2018). Plant-pathogen warfare under changing climate conditions. *Current Biology*, 28(10), R619-R634. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.03.054>
- Vukelić, I. D., Prokić, L. T., Racić, G. M., Pešić, M. B., Bojović, M. M., Sierka, E. M., ... & Panković, D. M. (2021). Effects of *Trichoderma harzianum* on photosynthetic characteristics and fruit quality of tomato plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 6961. <https://doi.org/10.3390/ijms22136961>
- Walder, F., Schmid, M. W., Riedo, J., Valzano-Held, A. Y., Banerjee, S., Büchi, L., ... van der Heijden, M. G. A. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 174, 108830. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108830>
- Wang, J., Li, X., Zhou, Y., Wang, H., & Li, M. (2022). Banana Pseudostem Width Detection Based on Kinect V2 Depth Sensor. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 3083647. <https://doi.org/10.1155/2022/3083647>
- Wang, Y., Yan, M., Wang, A., Ma, X., Tian, W., Liu, Y., ... & Li, S. (2025). Plants accumulate abscisic acid after *Ralstonia solanacearum* infection for enhanced dehydration tolerance and plant resistance. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1566215. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1566215>
- Yahiaoui, N., Chéron, J. J., Ravelomanantsoa, S., Hamza, A. A., Petrousse, B., Jeetah, R., ... & Poussier, S. (2017). Genetic diversity of the *Ralstonia solanacearum* species complex in the Southwest Indian Ocean Islands. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2139. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02139>
- Yan, L., & Khan, R. A. A. (2021). Biological control of bacterial wilt in tomato through the metabolites produced by the biocontrol fungus, *Trichoderma harzianum*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00351-9>
- 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>
- You, J., Li, G., Li, C., Zhu, L., Yang, H., Song, R., & Gu, W. (2022). Biological control and plant growth promotion by volatile organic compounds of *Trichoderma koningii* T-51. *Journal of Fungi*, 8(2), 131. <https://doi.org/10.3390/jof8020131>
- Yuliar, Nion, Y. A., & Toyota, K. (2015). Recent trends in control methods for bacterial wilt diseases caused by *Ralstonia solanacearum*. *Microbes and Environments*, 30(1), 1-11. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME14144>
- Zeist, A. R., Giacobbo, C. L., Silva, G. F. D., Zeist, R. A., Dorneles, K. D. R., & Resende, J. T. D. (2018). Compatibility of tomato cultivar Santa Cruz Kada grafted on different Solanaceae species and control of bacterial wilt. *Horticultura Brasileira*, 36(3), 377-381. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620180315>