

CIENCIA DE LAS PLANTAS

Control biológico de *Radopholus similis* (Cobb) Thorne mediante el uso de bacterias y hongos endófitos en *Musa paradisiaca* L.

Biological Control of *Radopholus similis* (Cobb) Thorne Using Endophytic Bacteria and Fungi in *Musa paradisiaca* L.

Markelyn Rodríguez-Zamora¹, Juan Carlos Morán Centeno², Jorge Ulises Blandón-Díaz³, Alfonso Martinuz⁴

¹ MSc. Sanidad Vegetal, Dirección de Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Agraria, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6826-1897> / markelyn.rodriguez@ci.una.edu.ni

² MSc. Agroecología y Desarrollo Sostenible, Dirección de Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Agraria, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6135-7271> / juan.moran@ci.una.edu.ni

³ PhD. Fitopatología, Dirección de Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Agraria, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7904-8853> / ulisesdb@ci.una.edu.ni

⁴ PhD. Agricultural Sciences Enfases Nematology and Plant Protection, Investigador independiente. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-6646> / alfonsomartinuz@gmail.com

Autor de correspondencia: markelyn.rodriguez@ci.una.edu.ni



RESUMEN

El plátano (*Musa* spp), es un cultivo de importancia económica en Nicaragua por su consumo interno como para su exportación. El presente estudio evaluó el efecto de la combinación de cepas endófiticas de *Bacillus subtilis* (B1 y B2), *Bacillus cereus*, *Pseudomonas* sp. y *Saccharomyces* sp., aisladas de raíces de plátano, como una alternativa biológica para el manejo de *Radopholus similis*, para ello se efectuó un diseño completo al azar, mediante inoculaciones simples, combinadas de bacterias y hongos en vitroplantas del cultivar CEMSA ¾. Se cuantificó el porcentaje de penetración del nematodo y porcentaje de control, se empleó una transformación arcoseno, para homogenizar varianza y se aplicó análisis de varianza y separaciones de media por Tukey (0.05). Las inoculaciones simples de *Saccharomyces* sp, y el testigo reflejaron una mayor tasa de penetración del nematodo. En cuanto al porcentaje de control lo presentaron las inoculaciones combinadas *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1), *Bacillus subtilis* (B2) + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp, así como *Bacillus subtilis* (B2) + *Pseudomonas*

ABSTRACT

Plantain (*Musa* spp.) is a crop of major economic importance in Nicaragua, both for domestic consumption and for export. The present study evaluated the effect of combining endophytic strains of *Bacillus subtilis* (B1 and B2), *Bacillus cereus*, *Pseudomonas* sp., and *Saccharomyces* sp., isolated from plantain roots, as a biological alternative for the management of *Radopholus similis*. A completely randomized design was employed, using single and combined inoculations of bacteria and fungi in vitroplants of the cultivar CEMSA ¾. The percentage of nematode penetration and the percentage of control were quantified. An arcsine transformation was applied to homogenize variances, followed by analysis of variance and mean separation using Tukey's test (0.05). Single inoculations of *Saccharomyces* sp. and the control treatment showed the highest nematode penetration rates. Regarding to the control percentage, the highest values were obtained with the combined inoculations composed by *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp. + *Saccharomyces* sp. + *Bacillus subtilis* (B1), *Bacillus subtilis* (B2) + *Pseudomonas* sp. + *Saccharomyces* sp., as well as *Bacillus*

Recibido: 16 de septiembre del 2025
Aceptado: 12 de diciembre del 2025



Los artículos de la revista La Calera de la Universidad Nacional Agraria, Nicaragua, se comparten bajo términos de la licencia Creative Commons: Reconocimiento, No Comercial, Compartir Igual. Las autorizaciones adicionales a las aquí delimitadas se pueden obtener en el correo donald.juarez@ci.una.edu.ni

© Copyright 2025. Universidad Nacional Agraria (UNA).

CIENCIA DE LAS PLANTAS

sp + *Saccharomyces* sp., al igual que *Bacillus subtilis* (B2) y *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1) redujeron las poblaciones de nematodos hasta en un 83 %; las inoculaciones con *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B2), *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1) presentaron la mayor altura. Las inoculaciones combinadas mejoran la eficiencia en el control de *Radopholus similis* siendo una alternativa sostenible y amigable con el ambiente.

Palabras clave: endofíticos, biomasa, biocontrol, promotores de crecimiento, vitroplantas.

subtilis (B2) + *Pseudomonas* sp. + *Saccharomyces* sp. Similarly, *Bacillus subtilis* (B2) alone and the combination of *Saccharomyces* sp. + *Bacillus subtilis* (B1), reduced nematode populations by up to 83%. The inoculations of *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp. + *Saccharomyces* sp. + *Bacillus subtilis* (B2) and *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp. + *Saccharomyces* sp. + *Bacillus subtilis* (B1) resulted in the greatest plant height. Combined inoculations improved the efficiency of *Radopholus similis* control, representing a sustainable and environmentally friendly alternative.

Keywords: Endophytic microorganisms, biomass, biocontrol, growth promoters, vitroplants.

El cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.), en Nicaragua constituye un componente esencial en la dieta de la población nicaragüense, desempeñando un papel clave en la generación de empleos directos e indirectos en los departamentos de Rivas y Chinandega, donde se concentra la mayor producción. En términos económicos, en el año 2022, el cultivo de plátano aportó 18.2 millones de dólares a la economía nacional, experimentando un crecimiento del 21.8 % en valor y del 6.6 % en volumen, en comparación con el año anterior (Ministerio Agropecuario [MAG], 2025, párr. 1).

Una de las limitantes en la producción de plátano es las afectaciones causadas por el nematodo *Radopholus similis*, endoparásito migratorio que afecta el sistema radicular mediante su estilete (estructura que usa para alimentarse), provocando el volcamiento de la planta; cuando esta se encuentra en estados de floración reduce severamente el peso del racimo y la vida útil de la plantación (Araya y Vargas, 2018; Bechem *et al.*, 2018); así mismo afecta directamente a través de sus complejas interacciones con otros patógenos que perturban directamente al cultivo al realizar lesiones en las raíces; dañando la morfología de la raíz (Roth *et al.*, 2019; Parrado y Quintanilla, 2024). Uno de los factores en el comportamiento de los nematodos es el tipo de alimentación, sus secreciones dependen del tipo de célula, que definen los cambios fisiológicos en la planta (Kumar y Yadav, 2020).

Para el manejo de las afectaciones por nematodos, se han implementado diversas alternativas de control, siendo el uso de nematicidas fumigantes y no fumigantes, una estrategia eficaz, pero que plantea riesgos en el ambientales y la salud humana. *Radopholus similis* sigue siendo una amenaza en los sistemas de producción de plátano (Mostafa *et al.*, 2019). Como alternativa para minimizar la carga química de los sistemas agrícolas donde se cultiva plátano, el uso de hongos y bacterias endofíticas ofrece una estrategia sostenible económicamente viable para el control de *Radopholus similis*.

Los microorganismos endofíticos son organismos simbióticos que colonizan los tejidos vegetales que inducen

a resistencia sistémica en su huésped y promueven la absorción de nutrientes; esto los convierte en alternativas sostenibles al minimizar el uso de nematicidas fumigantes y no fumigantes (Kumar y Dara, 2021). Estudios refieren que los endófitos producen metabolitos secundarios como flavonoides, péptidos, quinonas, alcaloides, esteroides, fenoles, terpenoides y policetona, que al entrar en contacto con los nematodos causan la muerte o repelen directamente la patogenicidad o reproducción de estos. lo mismo (Fadiji y Babalola, 2020).

Los hongos y bacterias endofíticas reducen entre 53 % y 76 % la mortalidad de infectivos juveniles de nematodos fitoparásitos y entre 70 % y 81 % repelen los infectivos juveniles al momento de la penetración en el sistema radicular (Vetrivelkalai, 2019). Así mismo inoculaciones combinadas de los siguientes géneros *Pantoea agglomerans*, *Cedecea daviseae*, *Enterobacter spp.*, y *Pseudomonas putida* redujeron la penetración temprana de *Meloidogyne incognita* en las raíces del tomate hasta en un 56 % cuando se aplicaron como tratamiento a las semillas (Munif *et al.*, 2019).

Las cepas pertenecientes a los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Saccharomyces* sp han sido reconocida por su uso en consorcio y ha demostrado la capacidad de controlar a los nematodos fitoparásitos (Khabbaz *et al.*, 2019); antagonizando directamente a los nematodos con la segregación de metabolitos secundarios y proteínas que inhiben físicamente su movimiento (Proenca *et al.*, 2019). Además de su capacidad en solubilizar compuestos como fósforo y potasio que promueven el crecimiento vegetal fortaleciendo directamente a la planta en contra del ataque de nematodos fitoparásitos (Raymaekers *et al.*, 2020).

El uso de hongos y bacterias endofíticas en inoculaciones combinadas y simples son soluciones prometedoras en el control biológico de nematodos fitoparásitos. Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la bacterias y hongos endofíticos nativas de raíces funcionales de plátano sobre el control de *Radopholus similis* y la promoción de crecimiento en vitroplantas de plátano, cultivar CEMSA ^{3/4}.

CIENCIA DE LAS PLANTAS

MATERIALES MÉTODOS

Ubicación del sitio y material experimental. El estudio se realizó en un invernadero de 300 m² ubicado en la Universidad Nacional Agraria (UNA), en Managua, capital de Nicaragua, ubicada a 12° 08' 52" de latitud Norte y 86° 09' 41" de longitud Oeste. El período del experimento fue de septiembre a diciembre del 2024. Las bacterias fueron dos aislados de *Bacillus subtilis* (B1 y B2), una cepa de *Bacillus cereus* y *Pseudomonas* sp, así como del hongo *Saccharomyces* sp., colectados de raíces funcionales de plantaciones comerciales de plátano del departamento de Rivas. Estos aislados mostraron antagonismo con *Radopholus similis* en ensayos in vitro por lo que fueron considerados en inoculaciones simples y combinadas (Cuadro 1) en vitroplantas del cultivar de plátano CEMSA ¾ con seis semanas de aclimatación en un sombreadero.

Diseño experimental. Se estableció un arreglo unifactorial en diseño completo al azar (DCA) con 16 tratamientos y cinco repeticiones, para un total de 80 unidades experimentales; cada unidad experimental estuvo representada por una planta. Por cada tratamiento se utilizaron cinco plantas establecidas en macetas de 11 cm de diámetro y 9.7 cm de altura, con un volumen de suelo de 754 gramos.

Preparación de los inóculos de los agentes bacterianos. Los aislados bacterianos se cultivaron por separado en placas de agar nutritivo por un periodo de tres días a temperatura ambiente 28 °C. Las unidades formadoras de colonias (UFC), se separaron del medio de cultivo agregando 10 ml de agua destilada estéril, raspando suavemente la superficie con un asa bacteriológica de plástico estéril (Chaves *et al.*, 2009). La suspensión se filtró a través de una gasa estéril en un vaso de precipitado previamente esterilizado. Las concentraciones celulares, se ajustaron a UFC mediante escala McFarland a una concentración de 1x10⁸ UFC ml⁻¹ (Gattoni *et al.*, 2023). Para las inoculaciones duales y combinadas se añadió 50:50 de cada suspensión individual, según cada tratamiento (Cuadro 1).

Variables evaluadas

Penetración de nematodos. Se realizaron cuatro inoculaciones individuales, siete duales, cuatro combinadas y un control (Cuadro 1), que consistió en la aplicación de una solución con los nematodos. Los inóculos de

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Descripción	Tipo de inoculación
T1	<i>Bacillus subtilis</i> (B1)	
T2	<i>Bacillus subtilis</i> (B2)	Individual
T3	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	
T4	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	
T5	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	
T6	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	Dual
T7	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Pseudomonas</i> spp	
T8	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	
T9	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	
T10	<i>Bacillus subtilis</i> (B1) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	
T11	<i>Bacillus subtilis</i> (B2) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	
T12	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	Combinada
T13	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	
T14	<i>Bacillus cereus</i>	Individual
T15	<i>Saccharomyces</i> sp	
T16	Testigo	Solución con nematodos

nematodos se obtuvieron de una población de *Radopholus similis* previamente de la cría de un cultivo monoxénico de *Radopholus similis* que crecieron en tres discos de zanahoria (*Daucus carota L.*). Dos semanas después, cada plántula fue inoculada con una población mixta de 500 nematodos juveniles, hembras y machos, realizando tres orificios a una profundidad entre 2 cm y 3 cm alrededor de la base del pseudotallo.

A los siete días después de la inoculación de los nematodos, las plantas se retiraron de las macetas y los nematodos fueron aislados de las raíces mediante el método de maceración y tamizado. La suspensión obtenida se cuantificó utilizando dos alícuotas (muestras) de 2 ml en una gradilla de conteo bajo microscopía de luz, con lo que se estimó el número de nematodos por gramo de raíz fresca (Mendoza *et al.*, 2009). La eficiencia de penetración (EP) de *Radopholus similis* se calculó conforme a la fórmula descrita por Zum Felde *et al.* (2006).

$$\%EP = \frac{\text{Número de nematodos en el sistema radicular}}{\text{Número de nematodos inoculados}} \times 100$$

Control biológico (%). A las ocho semanas después de la inoculación de los nematodos se determinó el porcentaje de control, siguiendo la metodología descrita por Araya, (2002). La cuantificación de *Radopholus similis* se estimó sobre la base del número total de nematodos en 10 g de raíces por planta. La eficacia de control biológico fue evaluada mediante la fórmula de Chaves *et al.* (2009).

$$\%CB = \frac{\text{Número de nematodos en el sistema radicular tratado}}{\text{Número de nematodos del control con solo nematodos}} \times 100$$

Para registrar el número de nematodos en el sistema radicular tratado en los 10 gramos de raíz, se contabilizaron el

CIENCIA DE LAS PLANTAS

total de nematodos en una alícuota de 1 ml de la solución de nematodos extraído por el método de maceración y tamizado, usando una cámara de conteo de nematodos mediante microscopía de luz.

Crecimiento de vitroplantas

Altura planta (cm). Se midió con una regla desde la base del pseudotallo al traslape de la hoja 1 y 2.

Diámetro del pseudotallo (mm). Se cuantificó con la ayuda de un vernier digital a dos centímetros de la base del pseudotallo.

Peso fresco raíz (g). En cada planta se separó con un bisturí las raíces del pseudotallo, para registrar su peso con una balanza digital Ohaus de 0.01 g a 4 000 g.

Peso fresco foliar (g). Se separaron las hojas y se pesaron con la misma balanza digital que se usó para determinar el peso fresco de raíz.

Peso fresco total. Se registró el peso total de la planta (hoja, pseudotallo y raíz) con la misma balanza digital que se usó para determinar el peso fresco de raíz.

Análisis de datos. Para comprobar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se empleó transformación con la función arcoseno para el porcentaje de penetración y control biológico, luego se realizó un análisis de varianza (ANDEVA). Al encontrar diferencias estadísticas, se compararon las medias a través de la prueba de diferencias mínimas de Tukey con un margen de error del 5 %, empleando el Software R versión 4.5.2 (R Core Team, 2025).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Total de nematodos y penetración (%). Se presentan diferencias estadísticas en el número total de nematodos y en el porcentaje de penetración en las raíces (Cuadro 2), también se observa que en la medida que disminuye la población total de nematodos, existen menores porcentajes de penetración, lo que indica una eficacia en el control de *Radopholus similis*.

El tratamiento a base de *Saccharomyces* sp., presentó mayor número total de nematodos, lo que indica que, aplicado de manera aislada, no reduce significativamente las poblaciones, al no lograr reducir la penetración ni su población final, mostrando valores similares al testigo. Este resultado demostró que *Saccharomyces* sp, no poseen mecanismos suficientes para reducir el proceso de invasión o establecimiento de *Radopholus similis*.

Los tratamientos más efectivos tanto para el número total como para el porcentaje de penetración corresponden a aquellos conformados solo por *Bacillus subtilis*, combinados entre sí o combinado con *Pseudomonas* sp. Estos tratamientos reducen la penetración y el establecimiento del nematodo en las raíces, lo que sugiere que *Bacillus*, en especial *Bacillus subtilis*, posee mecanismos que limitan tanto la invasión como la multiplicación de este nematodo, lo que lo clasifica como un biocontrolador de nematodos fitoparásitos.

Bacillus subtilis es una bacteria que logra reducir el número de infectivos juveniles de nematodos en el sistema radicular, ya que produce metabolitos como lipopéptidos y proteasas que tienen un efecto nematicida, lo que afecta la capacidad de penetración (Jiang *et al.*, 2021, Patil *et al.*, 2019).

Cuadro 2. Total de individuos y porcentaje de penetración de *Radopholus similis* a los siete días después de la inoculación

Tratamiento	Descripción de los tratamientos	Total de nematodos	Penetración (%)
T15	<i>Saccharomyces</i> sp	36 a	7 ab
T16	Testigo	32 ab	8 a
T12	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	30 abc	6 bc
T10	<i>Bacillus subtilis</i> (B1) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	26 bcd	5 cde
T11	<i>Bacillus subtilis</i> (B2) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	26 bcd	5 cde
T2	<i>Bacillus subtilis</i> (B2)	24 bcd e	5 cde
T8	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	24 bcd e	5 cde
T13	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp / <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	24 bcd e	5 cde
T14	<i>Bacillus cereus</i>	22 cde	5 cde
T4	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	23 cde	5 cde
T9	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	23 cde	6 bcd
T7	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Pseudomonas</i> spp	21 de	5 cde
T6	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	21 de	4 de
T3	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	19 de	4 de
T5	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	19 de	4 de
T1	<i>Bacillus subtilis</i> (B1)	18 e	3 e
<i>p</i> ≤ 0.05		<i>p</i> = 0.0001	<i>p</i> = 0.0001

Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza.

Las combinaciones múltiples entre *Bacillus*, *Pseudomonas* spp., y *Saccharomyces* sp., presentaron eficacia intermedia, lo que podría ocurrir debido a interacciones negativas entre estos microorganismos que disminuyen su acción antagónica, sin embargo, Sikora *et al.* (2010); Reimann *et al.* (2008), determinaron que las combinaciones de hongos y bacterias reducen la penetración de *Radopholus similis* en comparación con aplicaciones individuales; información similar fue publicada por Martínez *et al.* (2012), quienes indican que la inoculación simple y combinada tienen el potencial de reducir la penetración de nematodos en las raíces de plátano.

CIENCIA DE LAS PLANTAS

Control biológico (%). Se obtuvo diferencias estadísticas en el control biológico de *Radopholus similis*, las inoculaciones de *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1), al igual que *Bacillus subtilis* (B2) + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp., así como *Bacillus subtilis* (B2) + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp., al igual que *Bacillus subtilis* (B2) y *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1), redujeron las poblaciones entre 78 % y 83 % (Cuadro 3), se demuestra que las inoculaciones combinadas de bacterias endófitas reducen las poblaciones de *Radopholus similis*.

Los resultados indican que las inoculaciones aisladas, no reducen significativamente las poblaciones de nematodos. Estos resultados indican que *Bacillus subtilis* inoculado de manera aislada no posee mecanismos suficientes para reducir las poblaciones de *Radopholus similis*.

Bacillus subtilis es una bacteria gram positiva que produce compuestos bioactivos, incluyendo enzimas, antibióticos y toxinas nematicidas, que degradan la cutícula y afectan la movilidad, el desarrollo y la reproducción de los nematodos (Migunova et al., 2021; Vasanthan-Srinivasan et al., 2025).

Saccharomyces sp, aumenta la producción de catalasa y la pectina metil esterasa en raíces de banano reduciendo eficazmente la población de nematodos (Hamouda et al., 2019). los hongos emplean diversas estrategias de control de nematodos entre ellas una amplia variedad de metabolitos secundarios que

Cuadro 4. Altura de planta y diámetro del pseudotallo en respuesta a inoculaciones simples y combinadas de hongos y bacterias endofíticas

Tratamiento	Descripción	Diámetro del pseudotallo (mm)	Altura de plántula (cm)
T16	Testigo	7.2 ab	6.3 a
T6	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	6.9 abc	5.8 ab
T13	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	7.4 a	5.7 abc
T7	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Pseudomonas</i> spp	6.9 abc	5.7 abc
T8	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	7.1 ab	5.4 bcd
T10	<i>Bacillus subtilis</i> (B1) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	6.6 abcd	5.2 bcde
T12	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	7.4 a	5.2 bcde
T15	<i>Saccharomyces</i> sp	6.9 abc	5.1 bcde
T1	<i>Bacillus subtilis</i> (B1)	6.1 cd	5.0 bcdef
T14	<i>Bacillus cereus</i>	6.8 abc	5.0 bcdef
T5	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	6.8 abc	5.4 cdefg
T11	<i>Bacillus subtilis</i> (B2) + <i>Pseudomonas</i> sp / <i>Saccharomyces</i> sp	7.0 abc	4.9 defg
T4	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	6.8 abc	4.6 defg
T2	<i>Bacillus subtilis</i> (B2)	6.2 cd	4.4 efg
T3	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	6.3 bcd	4.3 fg
T9	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	5.7 d	4.2 g

p ≤ 0.05

p = 0.0001

p = 0.0001

Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza.

Cuadro 3. Control biológico de *Radopholus similis* por microorganismos endofíticos

Tratamiento	Descripción	Biocontrol (%)
T12	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	83 a
T11	<i>Bacillus subtilis</i> (B2) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	83 a
T10	<i>Bacillus subtilis</i> (B1) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	83 a
T2	<i>Bacillus subtilis</i> (B2)	79 a
T8	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	78 a
T15	<i>Saccharomyces</i> sp	75 ab
T14	<i>Bacillus cereus</i>	73 ab
T4	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	73 ab
T9	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	69 ab
T7	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Pseudomonas</i> spp	67 ab
T13	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp / <i>Saccharomyces</i> sp / <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	66 ab
T6	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	65 ab
T3	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	64 ab
T5	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	61 ab
T1	<i>Bacillus Subtilis</i> (B1)	59 ab
T16	Testigo	51 b

p ≤ 0.05

p = 0.0005

Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza.

controla nematodos fitoparásitos e induce la resistencia por parte de las plantas (Karajeh, 2013; Pires et al., 2022).

Sikora et al. (2010); Reimann et al. (2008), determinaron que las combinaciones de hongos y bacterias reducen las poblaciones de *Radopholus similis* en comparación con aplicaciones individuales; información similar fue publicada por Quevedo et al. (2021), quienes indican interacciones microbianas que promueven la producción de diversos compuestos activos que favorecen el crecimiento vegetal, así como la atracción, interrupción de la reproducción y depredación de nematodos fitopatógenos.

Crecimiento de vitroplantas. Se obtuvo diferencias estadísticas en la altura de las vitroplantas, las inoculaciones de *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B2) y *Bacillus cereus* + *Pseudomonas* sp + *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1), presentaron mayor altura respecto al tratamiento *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B2) (Cuadro 4).

Los organismos endofíticos colonizan los tejidos internos de las plantas, estableciendo relaciones simbióticas que favorecen significativamente las variables de crecimiento como la altura y diámetro del pseudotallo (Santos et al., 2018).

El género *Bacillus* es un promotor del crecimiento vegetativo sintetizando fitohormonas como el ácido indolacético (auxina), que estimula la elongación y división celular; infiriendo de esta forma

CIENCIA DE LAS PLANTAS

en el aumento de la altura de las plantas (Karthik *et al.*, 2017; Manohar y Selvarajan, 2018; Yusadi *et al.*, 2025).

El diámetro del pseudotallo presentó diferencias estadísticas. El mayor diámetro lo presentó el testigo respecto al tratamiento *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B2).

Bacillus mejora la absorción de agua y nutrientes, lo que se relaciona directamente con la altura y aumento del diámetro del pseudotallo (Chen *et al.*, 2000; Ruelas-Islas *et al.*, 2023).

Biomasa de la vitroplantas. Se presentan diferencias estadísticas en el peso fresco de raíz, hojas y peso fresco total (Cuadro 5). Los tratamientos a base de *Saccharomyces* sp + *Bacillus subtilis* (B1) y *Saccharomyces* sp + *Pseudomonas* spp obtuvieron el mayor peso fresco de raíz. El mayor peso fresco foliar (14.26) y peso fresco total (43.44) se obtiene con el tratamiento a base de *Saccharomyces* sp + *Pseudomonas* spp, lo que indica que inoculaciones con *Bacillus subtilis* (B1) y *Saccharomyces* sp aumentan el peso fresco.

Las inoculaciones simples son poco efectivas para aumentar peso fresco de raíz, peso fresco foliar y peso fresco total (Cuadro 5). Nakkeeran *et al.* (2021) explican que el efecto combinado de bacterias y hongos endófiticos, tienden a desarrollar mayor sistema radical en las plantas. Acaro y Cevallos, (2025), destacan la importancia de las raíces en el soporte de las plántulas y en el transporte de agua y nutrientes desde el suelo hacia la parte aérea.

La asociación de hongos y bacterias endofíticas, tienen efecto directo de manera positiva sobre el crecimiento vegetal de la planta huésped; Sekhar y Thomas, (2015); Souza *et al.* (2017) señalan que estas combinaciones modulan el crecimiento vegetal e inducen resistencia al ataque de patógenos, predominando las clases Actinobacteria, α -Proteobacteria, γ -Proteobacteria y Firmicutes, ésta última corresponde a un filo de bacteria, mayormente Gram positiva con pared celular robusta.

Cuadro 5. Biomasa por efecto de inoculaciones simples y combinadas de hongos y bacterias endofíticos

Tratamiento	Descripción	Peso fresco de raíz (g)	Peso fresco foliar (g)	Peso fresco total (g)
T8	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	11.52 a	11.44 abc	37.96 ab
T7	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Pseudomonas</i> spp	11.38 a	14.26 a	43.44 a
T1	<i>Bacillus subtilis</i> (B1)	11.30 ab	12.64 ab	38.20 ab
T5	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	11.28 ab	11.24 abcd	35.52 abc
T13	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	10.60 abc	10.68 abcd	34.64 abcd
T14	<i>Bacillus cereus</i>	10.38 abc	11.14 abcd	34.00 abcd
T6	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	9.94 abcd	11.48 abc	30.40 abcd
T3	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	9.78 abcd	8.80 bcd	30.66 abcd
T16	Testigo	9.36 abcd	12.14 ab	37.52 abc
T4	<i>Pseudomonas</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	9.02 abcd	7.44 d	25.44 bed
T11	<i>Bacillus subtilis</i> (B2) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	8.68 abcd	10.82 abcd	29.78 bcd
T10	<i>Bacillus subtilis</i> (B1) + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp	8.22 bcd	8.82 bcd	31.74 abcd
T12	<i>Bacillus cereus</i> + <i>Pseudomonas</i> sp + <i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B1)	8.20 bcd	9.02 bcd	27.62 bcd
T9	<i>Saccharomyces</i> sp + <i>Bacillus subtilis</i> (B2)	7.54 cd	7.72 cd	22.26 d
T15	<i>Saccharomyces</i> sp	7.18 d	9.64 bcd	27.30 bcd
T2	<i>Bacillus subtilis</i> (B2)	7.06 d	7.62 cd	24.84 cd
<i>p</i> ≤ 0.05		<i>p</i> = 0.0001	<i>p</i> = 0.0001	<i>p</i> = 0.0001

Promedios con letras iguales no difieren estadísticamente al 95 % de confianza.

CONCLUSIONES

La combinación de bacterias y hongos endofíticos inoculados en vitroplantas de plátano, es una alternativa eficaz para la reducción del uso de nematicidas químicos en el manejo del nematodo *Radopholus*

similis y como promotores del crecimiento vegetal, al mejorar la altura de planta, el diámetro del pseudotallo y la producción de biomasa; aunque su éxito depende de la compatibilidad de los microorganismos seleccionados.

CIENCIA DE LAS PLANTAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acaro Reyes, B. P. y Cevallos, S. (2025). Hongos asociados al cultivo de banano (*Musa* spp.) con potencial biotecnológico para el desarrollo de inoculantes. *Siembra*, 12(1), e7053. <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i1.7053>
- Araya, M. (2002). Metodología utilizada en el laboratorio de nematología de CORBANA S.A. para la extracción de nematodos de las raíces de banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*). *CORBANA*, 28(55), 1–16. <https://www.researchgate.net/publication/288946065>
- Araya, M. y Vargas, R. (2018). Frecuencia y densidades poblacionales de nematodos parásitos en plantaciones comerciales de banano (*Musa AAA*) muestradas en el intermedio madre-hijo y al frente del hijo de sucesión. *CORBANA*, 44(64), 71–96.
- Bechem, E. T., Wapouo, S. F., & Loubana, P. M. (2018). Nematicidal properties of endophytic fungi isolated from some *Musa* species in Cameroon for the management of *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae*. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 19(4), 1–19. <https://doi.org/10.9734/JABB/2018/45952>
- Chaves, N. P., Pocasangre, L. E., Elango, F., Rosales, F. E., & Sikora, R. (2009). Combining endophytic fungi and bacteria for the biocontrol of *Radopholus similis* and effects on plant growth. *Scientia Horticulturae*, 122(3), 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.025>
- Chen, J., Abawi, G. S., & Zuckerman, B. M. (2000). Efficacy of *Bacillus thuringiensis*, *Paecilomyces marquandii*, and *Streptomyces costaricanus* with and without organic amendments against *Meloidogyne hapla* infecting lettuce. *Journal of Nematology*, 32(1), 70–77.
- Fadiji, A. E., & Babalola, O. O. (2020). Elucidating mechanisms of endophytes used in plant protection and other bioactivities with multifunctional prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, Article 467. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00467>
- Gattoni, K. M., Park, S. W., & Lawrence, K. S. (2023). Evaluation of the mechanism of action of *Bacillus* spp. to manage *Meloidogyne incognita*. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1079109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079109>
- Hamouda, R., Al-Saman, M., & El-Ansary, M. (2019). Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis* on suppressing root-knot nematode *Meloidogyne incognita* infecting banana plants. *Egyptian Journal of Agronematology*, 18(2), 90–102. <https://doi.org/10.21608/EJAJ.2019.52593>
- Jiang, H., Tian, L., Bu, F., Sun, Q., Zhao, X., & Han, Y. (2021). RNA-seq-based identification of potential resistance genes against soybean cyst nematode. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 114, Article 101627. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2021.101627>
- Karajeh, M. R. (2013). Efficacy of *Saccharomyces cerevisiae* on controlling the root-knot nematode *Meloidogyne javanica*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 46(20), 2492–2500. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.799819>
- Karthik, M., Pushpakanth, P., Krishnamoorthy, R., & Senthilkumar, M. (2017). Endophytic bacteria associated with banana cultivars and their inoculation effect on plant growth. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 92(6), 568–576. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1310600>
- Khabbaz, S.E., Ladhalakshmi, D., Babu, M., Kandan, A., Ramamoorthy, V., Saravanakumar, D., Al-Mughrabi, T., Kandasamy, S. (2019). Plant growth promoting bacteria (PGPB) - A Versatile Tool for Plant Health Management. *Can. J. Pestic. Pest Manag.*, 1(1), 1–25. <https://doi.org/10.34195/can.j.ppm.2019.05.001>
- Kumar, Y., & Yadav, B. C. (2020). Plant-parasitic nematodes: Nature's most successful plant parasite. *Internacional Journal of Research and Review*, 7, 379–386. <https://doi.org/10.22271/ijrr.2020.v7.i3a.1029>
- Kumar, K. K., & Dara, S. K. (2021). Fungal and bacterial endophytes as microbial control agents for plant-parasitic nematodes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), Article 4269. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084269>
- Manohar Jebakumar, R., & Selvarajan, R. (2018). Bioprimer of micropropagated banana plants at pre-or post-BBTV inoculation stage with rhizosphere and endophytic bacteria determines their ability to induce systemic resistance against BBTV in cultivar Grand Naine. *Biocontrol Science and Technology*, 28(11), 1074-1090. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1514583>
- Martinuz, A., Schouten, A., Menjivar, R. D., & Sikora, R. A. (2012). Effectiveness of systemic resistance toward *Aphis gossypii* induced by endophytes. *Biological Control*, 62(3), 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.bioc.2012.05.006>
- Mendoza, A. R., & Sikora, R. A. (2009). Biological control of *Radopholus similis* in banana by combined application of endophytes. *BioControl*, 54(2), 263–272. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9181-x>
- Ministerio Agropecuario. (2025). *Producción de plátano 2022 aportó 18.2 millones de dólares a la economía nacional*. <https://www.mag.gob.ni/index.php/noticias?view=article&id=59:producci%C3%B3n-platano-aporta&catid=11>
- Migunova, V. D., Tomashevich, N. S., Konrat, A. N., Lychagina, S. V., Dubyaga, V. M., D'Addabbo, T., & Asaturova, A. M. (2021). Selection of bacterial strains for the control of root-knot disease caused by *Meloidogyne incognita*. *Microorganisms*, 9(8), Article 1698. <https://doi.org/10.3390/microorganismos9081698>
- Mostafa, D. M., Allah, S. F. A., & Awad-Allah, E. F. (2019). Potential of *Pleurotus sajor-caju* compost for controlling *Meloidogyne incognita* and improving nutritional status of tomato plants. *Journal of Plant Science and Phytopathology*, 2(4). <https://doi.org/10.29328/journal.jpst.1001042>

CIENCIA DE LAS PLANTAS

- Munif, A., Herliyana, E. N., & Pradana, A. P. (2019). Endophytic bacterial consortium originated from forestry plant roots and their nematicidal activity against *Meloidogyne incognita* infestation in greenhouse. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(5). <https://doi.org/10.11118/actaun201967051171>
- Nakkeeran, S., Rajamanickam, S., Saravanan, R., Vanthana, M., & Soorianathasundaram, K. (2021). Bacterial endophytome-mediated resistance in banana for the management of Fusarium wilt. *3 Biotech*, 11(6), Article 267. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02833-5>
- Parrado, L. M., & Quintanilla, M. (2024). Plant-parasitic nematode disease complexes as overlooked challenges to crop production. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1439951. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439951>
- Patil, G. B., Lakhssassi, N., Wan, J., Song, L., Zhou, Z., & Klepadlo, M. (2019). Whole-genome re-sequencing reveals the impact of the interaction of copy number variants of the *rhl1* and *Rhg4* genes on broad-based resistance to soybean cyst nematode. *Plant Biotechnology Journal*, 17, 1595–1611. <https://doi.org/10.1111/pbi.13086>
- Pires, D., Vicente, C. S., Menéndez, E., Faria, J. M., Rusinque, L., Camacho, M. J., & Inácio, M. L. (2022). The fight against plant-parasitic nematodes: Current status of bacterial and fungal biocontrol agents. *Pathogens*, 11(10), Article 1178. <https://doi.org/10.3390/pathogens11101178>
- Proença, D. N., Schwab, S., Vidal, M. S., Baldani, J. I., Xavier, G. R., & Morais, P. V. (2019). The nematicide *Serratia plymuthica* M24T3 colonizes *Arabidopsis thaliana*, stimulates plant growth, and shows beneficial potential for plants. *Brazilian Journal of Microbiology*, 50, 777–789. <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00098-y>
- Quevedo, A., Vera-Morales, M., Espinoza-Lozano, F., Castañeda-Ruiz, R. F., Sosa del Castillo, D., & Magdama, F. (2021). Evaluation of the predatory activity of *Arthrobotrys oligosporus* strain C-2197 as biocontrol of root-knot nematodes *Meloidogyne* spp. *Bionatura*, 6(1), 1586–1592. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.22>
- Raymaekers, K., Ponet, L., Holtappels, D., Berckmans, B., & Cammue, B. P. A. (2020). Screening for novel biocontrol agents applicable to plant disease management: A review. *Biological Control*, 144, Article 104240. <https://doi.org/10.1016/j.bioc.2020.104240>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.2) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Reimann, S., Hauschild, R., Hildebrandt, U., & Sikora, R. A. (2008). Interrelationship between *Rhizobium etli* G12 and *Glomus intraradices* and multitrophic effects in the biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on tomato. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 115, 108–113. <https://doi.org/10.1007/BF03356249>
- Roth, M. G., Noel, Z. A., Wang, J., Warner, F., Byrne, A. M., & Chilvers, M. I. (2019). Predicting soybean yield and sudden death syndrome development using at-planting risk factors. *Phytopathology*, 109(10), 1710–1719. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-19-0040-R>
- Ruelas-Islas, J. D. R., Peinado-Fuentes, L. A., Romero-Félix, C. S., Mendoza-Pérez, C., Celaya-Michel, H., Preciado-Rangel, P., & Núñez-Ramírez, F. (2023). Role of *Bacillus subtilis* and phosphorus dose on macronutrient concentration, distribution, and uptake in common bean. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1056>
- Santos, M. L. D., Berlitz, D. L., Wiest, S. L. F., Schünemann, R., Knaak, N., & Fiua, L. M. (2018). Benefits associated with the interaction of endophytic bacteria and plants. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 61, e18160431. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2018160431>
- Sekhar, A. C., & Thomas, P. (2015). Isolation and identification of shoot-tip-associated endophytic bacteria from banana cv. Grand Naine and antagonistic activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *American Journal of Plant Sciences*, 6(7), 943–954. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.67101>
- Sikora, R. A., Zum Felde, A., Mendoza, A., Menjivar, R., & Pocasangre, L. (2010). In planta suppressiveness to nematodes and long-term root health stability through biological enhancement: Do we need a cocktail? *Acta Horticultae*, 879, 553–560. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.879.60>
- Souza, G. L. O. D. D., Silva, D. F. D., Nietsche, S., Xavier, A. A., & Pereira, M. C. T. (2017). Endophytic bacteria used as bioinoculants in micropaginated banana seedlings. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(2), Article e-324. <https://doi.org/10.1590/0100-29452017324>
- Vasantha-Srinivasan, P., Park, K. B., Kim, K. Y., Jung, W. J., & Han, Y. S. (2025). Role of *Bacillus* species in the management of plant-parasitic nematodes. *Frontiers in Microbiology*, 15, Article 1510036. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1510036>
- Vetrivelkalai, P. (2019). Evaluation of endophytic bacterial isolates against root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in tomato under glasshouse condition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(1), 2584–2589.
- Yusadi, H., Pambudi, A., & Effendi, Y. (2025). Molecular and growth responses of *Musa acuminata* var. Barangan post application of beneficial endophytic bacteria. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 30(1), 40–47. <https://doi.org/10.18343/jipi.30.1.40>
- Zum Felde, A., Pocasangre, L. E., Carnizares Monteros, C. A., Sikora, R. A., Rosales, F. E., & Riveros, A. S. (2006). Effect of combined inoculations of endophytic fungi on the biocontrol of *Radopholus similis*. *InfoMusa*, 15(1–2), 12–17.