

Artículo

Potencial biocontrolador de *Purpureocillium lilacinum* contra *Meloidogyne incognita* en condiciones controladas

Biocontrol Potential of *Purpureocillium lilacinum* against *Meloidogyne incognita* under Controlled Conditions

José Enrique Nieto Rodríguez ^{1*}, Moisés Arturo Menace Almea ², Hayron Fabricio Chanchignia Martínez ³, Oscar Oswaldo Prieto Benavides ⁴ y Jeison Daniel Zambrano Flores ⁵

¹ Universidad Técnica estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0002-7919-9918>

² Universidad Técnica estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0002-4636-2520>, mmenace@uteq.edu.ec

³ Universidad Técnica estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0003-1195-5446>, hcanchignia@uteq.edu.ec

⁴ Universidad Técnica estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>, oprieto@uteq.edu.ec

⁵ Universidad Técnica estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0009-0001-3073-5759>, jzambranof@uteq.edu.ec

* Correspondencia: jnieto@uteq.edu.ec

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n3/176>

Cita: Nieto Rodríguez, J. E., Menace Almea, M. A., Chanchignia Martínez, H. F., Prieto Benavides, O. O., & Zambrano Flores, J. D. (2026). Potencial biocontrolador de *Purpureocillium lilacinum* contra *Meloidogyne incognita* en condiciones controladas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(3), 184-202. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n3/176>

Recibido: 25/06/2026

Revisado: 08/08/2026

Aceptado: 10/08/2026

Publicado: 13/08/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Resumen: *Meloidogyne incognita* es uno de los nematodos fitoparásitos de mayor importancia económica debido a las pérdidas que ocasiona en cultivos hortícolas y a las limitaciones asociadas con el uso de nematicidas sintéticos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial biocontrolador de tres cepas de *Purpureocillium lilacinum* (CEP1, CEP2 y CEP3) frente a *M. incognita* en plantas de tomate bajo condiciones controladas. Se determinaron el número de agallas, la densidad de juveniles de segundo estadio (J2) por gramo de suelo, la colonización del sistema radical y del suelo por el hongo, así como la biomasa fresca y seca de las raíces. Además, se realizaron análisis de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (PCA) para integrar las variables evaluadas. Las tres cepas redujeron significativamente el desarrollo del nematodo respecto al control infestado; sin embargo, CEP1 presentó la mayor eficacia, con reducciones del 93.9 % en la formación de agallas y del 89.8 % en la población de juveniles J2. Asimismo, CEP1 alcanzó la mayor colonización radical (70.7 %) y del suelo (33.3), acompañada por los mayores incrementos en biomasa fresca (7.3 g planta⁻¹) y biomasa seca radical (1.10 g planta⁻¹). El análisis de correlación mostró asociaciones positivas entre agallas y población de J2 ($r = 0.68$), mientras que ambas variables se correlacionaron negativamente con la colonización de *P. lilacinum* y el desarrollo radical. El PCA explicó el 91.9 % de la variabilidad total y confirmó una clara separación entre el tratamiento control y las cepas inoculadas. Estos resultados demuestran que *P. lilacinum*, particularmente la cepa CEP1, posee un elevado potencial como agente de control biológico para el manejo sostenible de *M. incognita* en tomate.

Palabras clave: *Meloidogyne incognita*; control biológico; nematodos agalladores; tomate; colonización radical.

Abstract: *Meloidogyne incognita* is one of the most economically important plant-parasitic nematodes, causing substantial yield losses in horticultural crops worldwide.

The increasing restrictions on chemical nematicides have intensified the search for sustainable biological control alternatives. This study evaluated the biocontrol potential of three *Purpureocillium lilacinum* isolates (CEP1, CEP2, and CEP3) against *M. incognita* in tomato plants under controlled conditions. The number of root galls, second-stage juvenile (J2) density per gram of soil, fungal colonization of the root system and soil, and fresh and dry root biomass were assessed. Pearson correlation analysis and principal component analysis (PCA) were performed to investigate the relationships among nematological, microbiological, and agronomic variables. All *P. lilacinum* isolates significantly suppressed nematode development compared with the infested control. Isolate CEP1 exhibited the highest biocontrol efficacy, reducing root gall formation by 93.9% and J2 density by 89.8%. CEP1 also achieved the greatest root colonization (70.7%) and soil colonization (33.3), which was associated with increased fresh (7.3 g plant⁻¹) and dry (1.10 g plant⁻¹) root biomass. Correlation analysis revealed a positive association between root gall formation and J2 density ($r = 0.68$), whereas both variables were negatively correlated with fungal colonization and root biomass. PCA explained 91.9% of the total data variability and clearly separated the infested control from the fungal treatments, highlighting the close association between *P. lilacinum* establishment, nematode suppression, and improved root development. These findings demonstrate that *P. lilacinum*, particularly isolate CEP1, is a promising biological control agent for the sustainable management of *M. incognita* in tomato production systems and supports its integration into environmentally friendly nematode management strategies.

Keywords: *Meloidogyne incognita*; biological control; root-knot nematodes; tomato; root colonization.

1. Introducción

Los nematodos fitoparásitos representan una de las principales limitantes para la producción agrícola mundial debido a las pérdidas económicas que ocasionan en una amplia variedad de cultivos de importancia comercial (Khan, 2023). Entre ellos, los nematodos agalladores del género *Meloidogyne* destacan por su amplia distribución geográfica, elevado rango de hospederos y alta capacidad de adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas (Walia et al., 2023). En particular, *Meloidogyne incognita* constituye una de las especies de mayor importancia económica, ya que infecta más de 3.000 especies vegetales, incluyendo hortalizas, frutales, ornamentales y cultivos industriales (Rusique et al., 2023). La infección provoca la formación de agallas en las raíces, alterando el sistema vascular y reduciendo la absorción de agua y nutrientes, lo que se traduce en disminuciones significativas del crecimiento, el rendimiento y la calidad de las cosechas (Tapia et al., 2022). Se estima que los nematodos fitoparásitos ocasionan pérdidas superiores a los 150 mil millones de dólares anuales a nivel mundial, siendo *Meloidogyne* uno de los géneros con mayor impacto económico en la agricultura (Elhady et al., 2024).

El manejo de *M. incognita* ha dependido históricamente del uso de nematicidas químicos. Sin embargo, el empleo continuo de estos productos ha generado preocupaciones relacionadas con la contaminación ambiental, la toxicidad para organismos no objetivo, la alteración de la microbiota benéfica del suelo y el riesgo para la salud humana (Parrado, y Quintanilla, 2024). Además, las restricciones regulatorias impuestas sobre numerosos ingredientes activos han reducido considerablemente las opciones disponibles para el control químico, impulsando la búsqueda de alternativas sostenibles que sean eficaces y ambientalmente seguras (Azlay et al., 2022). En este contexto, el control biológico ha adquirido un papel protagónico dentro de los programas de manejo integrado de nematodos, al ofrecer estrategias compatibles con una agricultura más sostenible y resiliente (Mwamula et al., 2022).

Entre los microorganismos utilizados como agentes de control biológico, el hongo nematófago *Purpureocillium lilacinum* (Thom) Luangsa-ard, Houbraken, Hywel-Jones y Samson (anteriormente *Paecilomyces lilacinus*) ha demostrado un elevado potencial para reducir poblaciones de nematodos fitoparásitos (Abd-Elgawad et al., 2024). Este hongo posee una notable capacidad para colonizar la rizósfera y parasitar huevos, hembras y, en menor grado, juveniles de diversas especies de *Meloidogyne*. Su actividad antagonista se basa en la producción de enzimas hidrolíticas y metabolitos nematocidas, la competencia por recursos en la rizósfera y la inducción de defensas en la planta hospedera. La acción simultánea de estos mecanismos convierte a *P. lilacinum* en uno de los agentes biológicos más estudiados para el manejo de nematodos agalladores (Rigobelo et al., 2024).

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de *P. lilacinum* reduce significativamente la eclosión de huevos, incrementa la mortalidad de juveniles de segundo estadio (J2), disminuye el número de agallas y masas de huevos, reduce el factor de reproducción del nematodo y favorece el crecimiento de las plantas bajo condiciones de invernadero y campo (Khan et al., 2023). Asimismo, se ha reportado que este hongo puede actuar como microorganismo promotor del crecimiento vegetal al mejorar el desarrollo radicular, incrementar la absorción de nutrientes y fortalecer la tolerancia de las plantas frente al estrés biótico ocasionado por *M. incognita* (Ali et al., 2024). No obstante, la eficacia del biocontrol depende de factores como la cepa utilizada, la concentración del inóculo, las características fisicoquímicas del suelo, la temperatura, la humedad y la especie vegetal hospedera, lo que explica la variabilidad observada entre diferentes estudios y resalta la necesidad de realizar evaluaciones bajo condiciones experimentales controladas (El-Marzoky et al., 2025).

A pesar del creciente número de bioinsumos comerciales formulados con *P. lilacinum*, aún existe información limitada acerca de su desempeño bajo protocolos experimentales estandarizados que permitan cuantificar con precisión su capacidad de supresión sobre *M. incognita* (Nagachandrabose et al., 2025). La caracterización de su eficacia mediante variables nematológicas y agronómicas constituye un paso fundamental para fortalecer el conocimiento sobre su potencial como componente de programas de manejo integrado de nematodos y reducir la dependencia de nematocidas sintéticos (De Souza et al., 2026).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial biocontrolador de *P. lilacinum* frente a *M. incognita* bajo condiciones controladas, mediante la determinación de su efecto sobre la infección, reproducción y desarrollo del nematodo, así como su influencia sobre el crecimiento de las plantas. Los resultados obtenidos contribuirán a generar evidencia científica que respalde el uso de este hongo como una alternativa sostenible para el manejo de nematodos fitoparásitos dentro de sistemas agrícolas modernos.

2. Metodología

2.1. Sitio experimental y condiciones del ensayo

La investigación se desarrolló bajo condiciones controladas de invernadero con el propósito de evaluar el potencial biocontrolador de diferentes cepas de *P. lilacinum* frente a *M. incognita* en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Durante el

experimento se mantuvieron condiciones ambientales favorables para el desarrollo tanto del cultivo como del nematodo, con temperaturas comprendidas entre 25 y 30 °C, humedad relativa entre 70 y 80 % y fotoperiodo natural. Las plantas fueron establecidas en macetas individuales que contenían un sustrato previamente esterilizado para evitar la interferencia de microorganismos nativos.

2.2. Material biológico

Se utilizaron tres cepas de *P. lilacinum*, denominadas CEP1, CEP2 y CEP3, previamente conservadas en el laboratorio y multiplicadas en medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA). Después de la incubación, las conidias fueron recuperadas mediante lavado con agua destilada estéril suplementado con 0.01 % de Tween 80. La suspensión se homogenizó y la concentración de conidias fue ajustada mediante recuento en cámara de Neubauer hasta obtener una concentración de 1×10^7 conidias mL⁻¹, utilizada para la inoculación de las plantas.

El inóculo de *M. incognita* se obtuvo a partir de raíces de tomate naturalmente infestadas. Las masas de huevos fueron extraídas y sometidas a incubación para favorecer la eclosión de juveniles de segundo estadio (J2), los cuales fueron cuantificados bajo microscopio estereoscópico antes de su utilización.

2.3. Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA), conformado por cuatro tratamientos: tres tratamientos inoculados con las cepas CEP1, CEP2 y CEP3 de *P. lilacinum* y un tratamiento control infestado únicamente con *M. incognita*. Cada tratamiento estuvo constituido por tres repeticiones experimentales, considerando una planta como unidad experimental.

2.4. Inoculación de las plantas

Las plántulas de tomate fueron trasplantadas a macetas individuales y se dejaron establecer durante un periodo de adaptación. Posteriormente, cada planta fue inoculada con una suspensión de juveniles de segundo estadio de *M. incognita*, depositada alrededor de la zona radical mediante pequeños orificios realizados en el sustrato para facilitar el contacto del inóculo con las raíces.

Transcurridas 24 horas después de la inoculación del nematodo, se aplicó la suspensión de conidias de *P. lilacinum* correspondiente a cada tratamiento mediante un drench dirigido a la rizósfera. El tratamiento control recibió únicamente agua destilada estéril en el mismo volumen utilizado para los tratamientos inoculados con el hongo.

Durante todo el periodo experimental las plantas recibieron riego periódico y manejo agronómico uniforme, evitando la aplicación de productos fitosanitarios que pudieran afectar el desarrollo del microorganismo biocontrolador.

2.5. Variables evaluadas

Al finalizar el periodo experimental, las plantas fueron cuidadosamente extraídas de las macetas y el sistema radical fue lavado con agua corriente para eliminar los restos de suelo adheridos.

La severidad de la infección se determinó mediante el conteo directo del número de agallas presentes en cada sistema radical. Posteriormente, se cuantificó la población de juveniles de segundo estadio (J2) presentes en el suelo mediante extracción nematológica y el resultado fue expresado como número de juveniles por gramo de suelo.

La capacidad de establecimiento de *P. lilacinum* fue evaluada mediante la determinación del porcentaje de colonización del sistema radical y la cuantificación de la colonización del suelo. Para ello se realizaron aislamientos microbiológicos sobre medios selectivos, registrándose la presencia y abundancia relativa del hongo en cada tratamiento.

Finalmente, las raíces fueron secadas superficialmente con papel absorbente para determinar la biomasa fresca mediante pesaje en balanza analítica. Posteriormente fueron colocadas en una estufa de secado a **65 °C** hasta alcanzar peso constante y se registró la biomasa seca radical.

2.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el software R versión 4.6.1. Previamente se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro–Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

Las diferencias entre tratamientos fueron evaluadas mediante análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Adicionalmente, se calcularon los porcentajes de reducción de la formación de agallas y de la población de juveniles J2 con respecto al tratamiento control infestado utilizando la expresión:

$$\text{Reducción (\%)} = \frac{C - T}{C} \times 100$$

donde C corresponde al valor medio del tratamiento control y T al valor medio del tratamiento evaluado.

Con el fin de explorar las relaciones entre las variables nematológicas, microbiológicas y agronómicas, se realizó un análisis de correlación de Pearson y un análisis de componentes principales (PCA), utilizando datos previamente estandarizados. Asimismo, se elaboraron diagramas de dispersión para evaluar la relación entre la colonización radical de *P. lilacinum*, la formación de agallas y la densidad de juveniles J2 en el suelo. Todos los resultados fueron representados mediante gráficos generados con los paquetes ggplot2, FactoMineR, factoextra, corrplot y ggpubr del entorno R, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

3. Resultados y Discusión

Formación de agallas

La formación de agallas difirió marcadamente entre los tratamientos evaluados (Figura 1). El tratamiento control presentó el mayor número de agallas por planta, con un promedio de 88.0 ± 41.2 , evidenciando una alta susceptibilidad a la infección por *M. incognita*. En contraste, las plantas tratadas con *P. lilacinum* mostraron una reducción considerable en la formación de agallas. La cepa CEP1 registró el menor número de agallas (5.3 ± 5.8), seguida de CEP3 (17.3 ± 3.2) y CEP2 (17.7 ± 10.2). En términos

relativos, CEP1 redujo la formación de agallas en un 93.9 % respecto al control, mientras que CEP2 y CEP3 alcanzaron reducciones del 79.9 % y 80.3 %, respectivamente. Estos resultados evidencian una mayor eficacia biocontroladora de la cepa CEP1 para limitar el establecimiento y desarrollo de *M. incognita* en el sistema radical del tomate.

La formación de agallas constituye la consecuencia directa del establecimiento exitoso de *M. incognita* en los tejidos radicales. Después de la penetración de los juveniles de segundo estadio (J2), el nematodo migra intercelularmente hasta el cilindro vascular, donde secreta un complejo repertorio de proteínas efectoras provenientes de las glándulas esofágicas dorsales y subventrales (Ren et al., 2024). Estas moléculas reprograman la expresión génica de las células del hospedero mediante la alteración de rutas hormonales dependientes de auxinas, citoquininas y etileno, promoviendo la diferenciación de células gigantes multinucleadas que funcionan como sitios permanentes de alimentación (Sun et al., 2024).

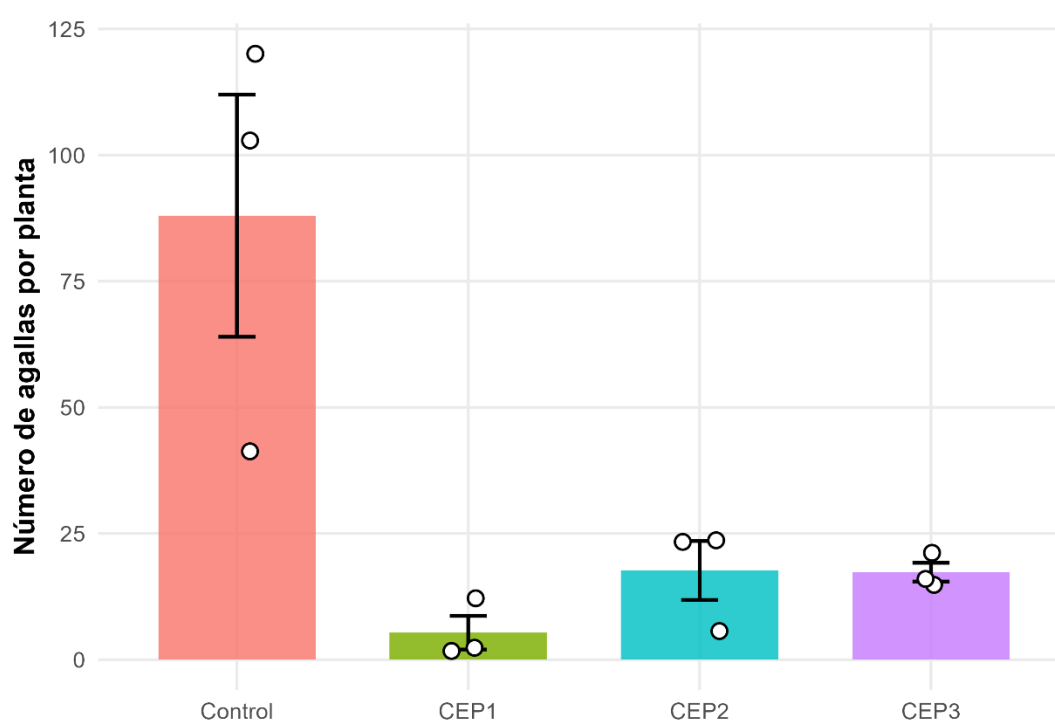


Figura 1. Efecto de diferentes cepas de *P. lilacinum* sobre la formación de agallas ocasionadas por *M. incognita* en plantas de tomate bajo condiciones controladas. Las barras representan la media del número de agallas por planta y las barras de error corresponden a la desviación estándar ($\pm$ DE). Los círculos indican las observaciones individuales de cada repetición ($n = 3$).

Población de juveniles de segundo estadio

La población de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* en el suelo fue significativamente menor en las plantas tratadas con *P. lilacinum* en comparación con el tratamiento control (Figura 2). El control presentó la mayor densidad poblacional, con un promedio de 65.3 ± 37.3 J2 g^{-1} de suelo. En contraste, la cepa CEP1 registró la menor población de juveniles (6.7 ± 5.0 J2 g^{-1} de suelo), seguida de CEP3 (14.7 ± 4.6 J2 g^{-1} de suelo) y CEP2 (21.0 ± 11.0 J2 g^{-1} de suelo). En términos relativos, CEP1 redujo la población de juveniles en un 89.8 % respecto al control, mientras que CEP2 y CEP3

alcanzaron reducciones del 67.9 % y 77.6 %, respectivamente. Estos resultados indican que las cepas evaluadas disminuyeron la supervivencia y reproducción del nematodo en el suelo, siendo CEP1 la que presentó la mayor eficacia biocontroladora.

P. lilacinum puede reducir la población de J2 mediante mecanismos directos e indirectos (Moreira et al., 2024). El mecanismo más importante es el parasitismo de huevos y masas de huevos, ya que el hongo se adhiere a su superficie, germina y penetra las cubiertas protectoras mediante presión mecánica y secreción de enzimas hidrolíticas. Entre estas enzimas destacan quitinasas, proteasas, lipasas y glucanasas, capaces de degradar los componentes estructurales de la cubierta del huevo.

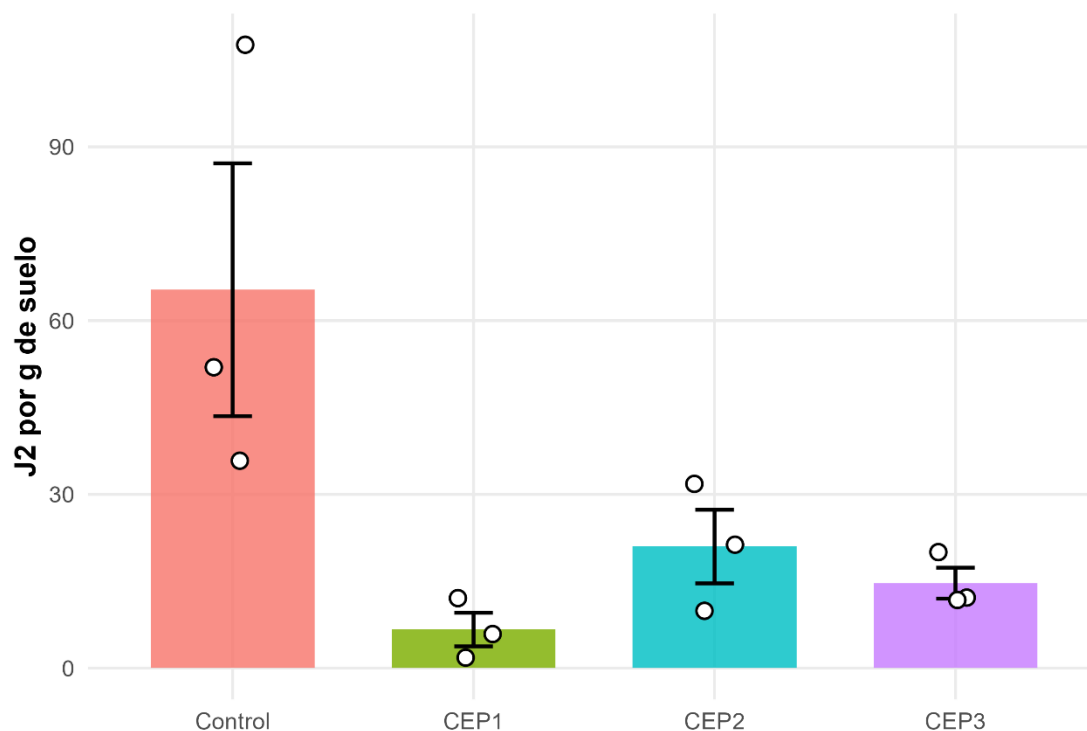


Figura 2. Población de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* por gramo de suelo en plantas de tomate tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum* bajo condiciones controladas. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los puntos corresponden a las observaciones individuales de cada repetición. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Colonización del sistema radical

La colonización del sistema radical por *P. lilacinum* presentó diferencias entre las cepas evaluadas (Figura 3). Como era de esperarse, el tratamiento control no mostró colonización (0 %), confirmando la ausencia del agente biocontrolador. Entre las cepas evaluadas, CEP1 alcanzó el mayor porcentaje de colonización radical, con un promedio de 70.7 ± 0.6 %, seguida de CEP2 (63.3 ± 8.4 %) y CEP3 (58.3 ± 19.7 %). Aunque CEP3 presentó una elevada variabilidad entre repeticiones, las tres cepas lograron establecerse exitosamente en el sistema radical del tomate. La mayor colonización observada en CEP1 coincidió con la menor formación de agallas y la menor densidad de juveniles J2 en el suelo, lo que sugiere una relación positiva entre la capacidad de colonización del hongo y su eficacia para suprimir el desarrollo de *M. incognita*.

Los exudados radicales contienen azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos,

compuestos fenólicos y otras moléculas señalizadoras que pueden estimular la germinación y el crecimiento de hongos rizosféricos (Chen et al., 2024). Una vez iniciada la colonización, *P. lilacinum* puede formar redes miceliales sobre la superficie de la raíz y establecer asociaciones endofíticas o semendofíticas en determinados tejidos, sin causar síntomas de enfermedad. Esta interacción le permite mantenerse próximo a los sitios donde los juveniles J2 intentan penetrar, incrementando la probabilidad de interferir con el proceso infeccioso (Halshoy et al., 2025).

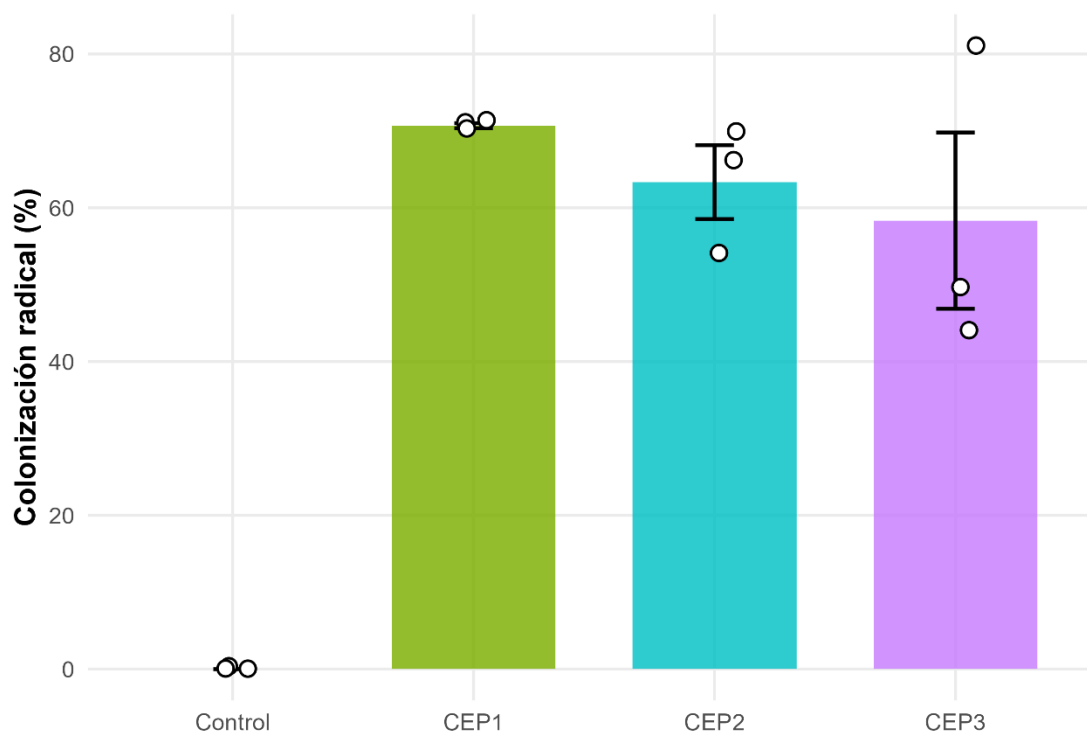


Figura 3. Colonización del sistema radical (%) por diferentes cepas de *P. lilacinum* en plantas de tomate inoculadas con *M. incognita* bajo condiciones controladas. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los puntos corresponden a las observaciones individuales de cada repetición. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Colonización del suelo

La colonización del suelo por *P. lilacinum* varió entre las cepas evaluadas (Figura 4). Como era de esperarse, el tratamiento control no presentó colonización del suelo, confirmando la ausencia del hongo biocontrolador. Entre las cepas inoculadas, CEP1 registró la mayor colonización, con un valor promedio de 33.3 ± 1.5 , seguida de CEP3 (32.3 ± 2.5), mientras que CEP2 presentó el menor valor de colonización (25.0 ± 9.5), además de una mayor variabilidad entre repeticiones. La elevada colonización observada en CEP1 y CEP3 evidencia una adecuada capacidad de establecimiento y persistencia del hongo en el suelo, característica que podría favorecer una interacción prolongada con los diferentes estadios de *M. incognita*. En particular, la mayor colonización alcanzada por CEP1 coincidió con la menor formación de agallas y la menor densidad de juveniles J2, lo que respalda su mayor potencial como agente de control biológico.

Tras la aplicación al suelo, las conidias de *P. lilacinum* germinan en respuesta a señales químicas procedentes de exudados radicales y materia orgánica, desarrollando un

sistema de hifas que coloniza tanto la rizósfera como las partículas del suelo (Zhang et al., 2023). Este crecimiento favorece la formación de una red micelial que incrementa el contacto con huevos, juveniles y hembras del nematodo, aumentando la probabilidad de parasitismo y de exposición a metabolitos antifittonematodos. La persistencia del micelio también permite mantener una fuente continua de propágulos infecciosos, lo que prolonga la actividad biológica del agente de control durante el desarrollo del cultivo (Silva et al., 2022).

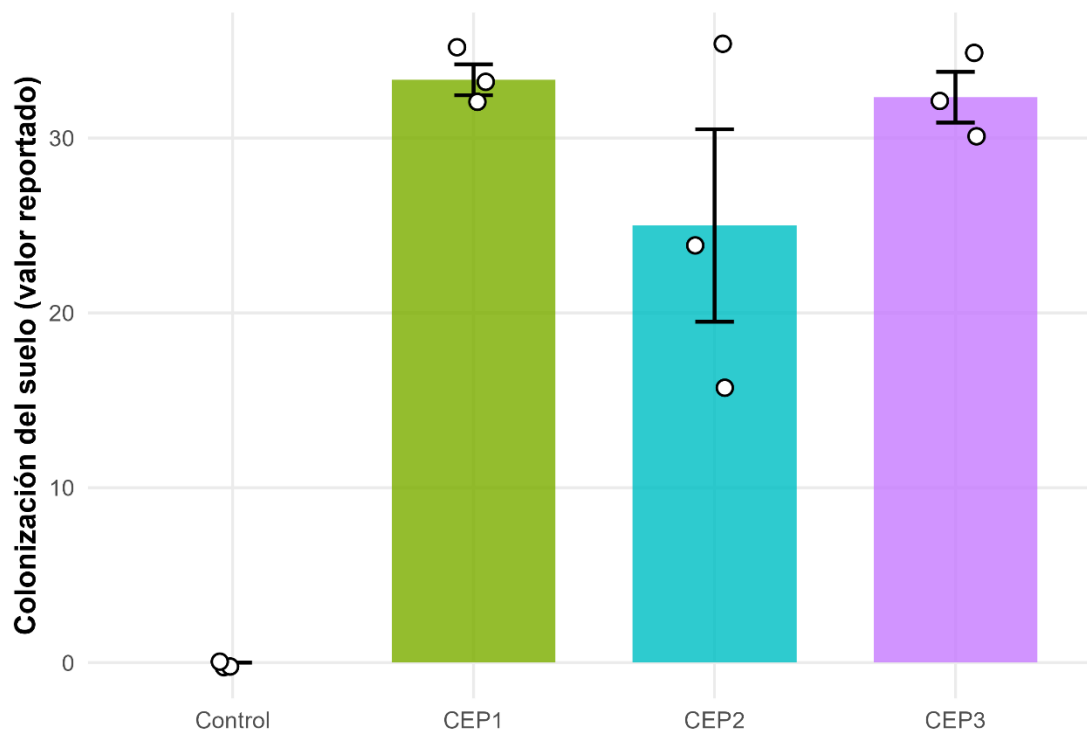


Figura 4. Colonización del suelo por diferentes cepas de *P. lilacinum* en plantas de tomate inoculadas con *M. incognita* bajo condiciones controladas. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los puntos corresponden a las observaciones individuales de cada repetición. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Biomasa fresca radical

La biomasa fresca radical presentó diferencias entre los tratamientos evaluados (Figura 5). Las plantas del tratamiento control registraron el menor peso fresco de raíces, con un promedio de 3.3 ± 1.5 g planta⁻¹, lo que evidencia el efecto negativo de la infección por *M.e incognita* sobre el desarrollo del sistema radical. En contraste, las plantas tratadas con *P. lilacinum* mostraron un incremento en la biomasa radical. La cepa CEP1 presentó el mayor peso fresco de raíces (7.3 ± 1.2 g planta⁻¹), seguida de CEP2 (6.0 ± 1.7 g planta⁻¹) y CEP3 (5.3 ± 1.3 g planta⁻¹). En comparación con el control, CEP1 incrementó la biomasa fresca radical en aproximadamente un 120 %, mientras que CEP2 y CEP3 registraron incrementos cercanos al 80 % y 60 %, respectivamente. Estos resultados indican que la aplicación de *P. lilacinum* favoreció el crecimiento del sistema radical, siendo CEP1 la cepa que mostró el mayor efecto promotor del desarrollo de las raíces.

La infección por *M. incognita* altera profundamente la organización anatómica y fisiológica de la raíz. La inducción de células gigantes y tejidos agallados modifica el

flujo normal de agua y nutrientes, incrementa el costo metabólico del tejido parasitado y reduce la formación de raíces laterales funcionales. Además, el daño ocasionado por la penetración y migración de los juveniles compromete la integridad de la epidermis y la corteza, limita la absorción de minerales y favorece desequilibrios hídricos. Como consecuencia, disminuye la expansión del sistema radical y se reduce la acumulación de biomasa.

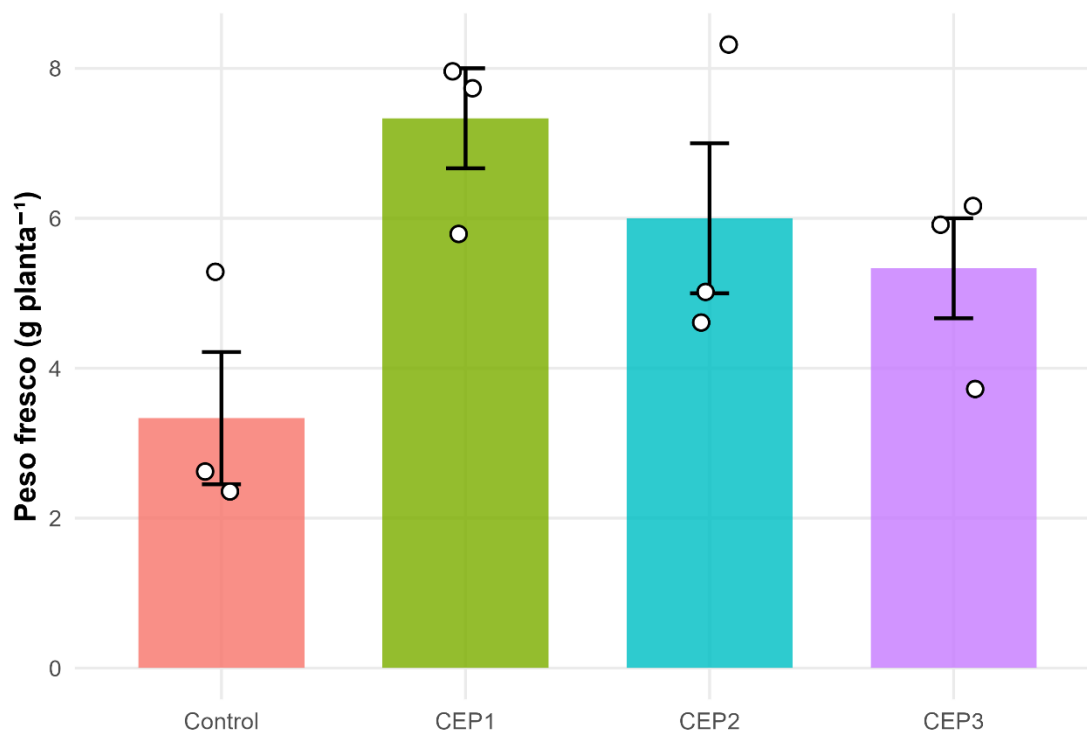


Figura 5. Biomasa fresca radical de plantas de tomate inoculadas con *M. incognita* y tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum* bajo condiciones controladas. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los puntos corresponden a las observaciones individuales de cada repetición. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Biomasa seca radical

La biomasa seca radical mostró una respuesta consistente con la observada para la biomasa fresca (Figura 6). El tratamiento control presentó el menor peso seco de raíces, con un promedio de 0.50 ± 0.22 g planta⁻¹, evidenciando la reducción del crecimiento radical ocasionada por la infección de *M. incognita*. Por el contrario, las plantas tratadas con *P. lilacinum* registraron valores superiores de biomasa seca. La cepa CEP1 alcanzó el mayor peso seco de raíces (1.10 ± 0.15 g planta⁻¹), seguida de CEP2 (0.90 ± 0.22 g planta⁻¹) y CEP3 (0.80 ± 0.15 g planta⁻¹). En comparación con el tratamiento control, CEP1 incrementó la biomasa seca radical en aproximadamente un 120 %, mientras que CEP2 y CEP3 registraron incrementos cercanos al 80 % y 60 %, respectivamente. Estos resultados evidencian que la aplicación de *P. lilacinum* favoreció el desarrollo estructural del sistema radical, siendo CEP1 la cepa con mayor capacidad para promover la acumulación de biomasa en las raíces.

La infección por *M. incognita* puede reducir la acumulación de biomasa seca debido a la alteración del balance fuente–sumidero de la planta. La formación de células gigantes y agallas convierte al tejido infectado en un sumidero metabólico de alta demanda, que

desvía fotoasimilados, aminoácidos y minerales hacia los sitios de alimentación del nematodo (Penlap, 2026). Este redireccionamiento de recursos limita la disponibilidad de carbono y energía para la formación de nuevas raíces, la elongación celular y la síntesis de tejidos funcionales (Bell et al., 2026).

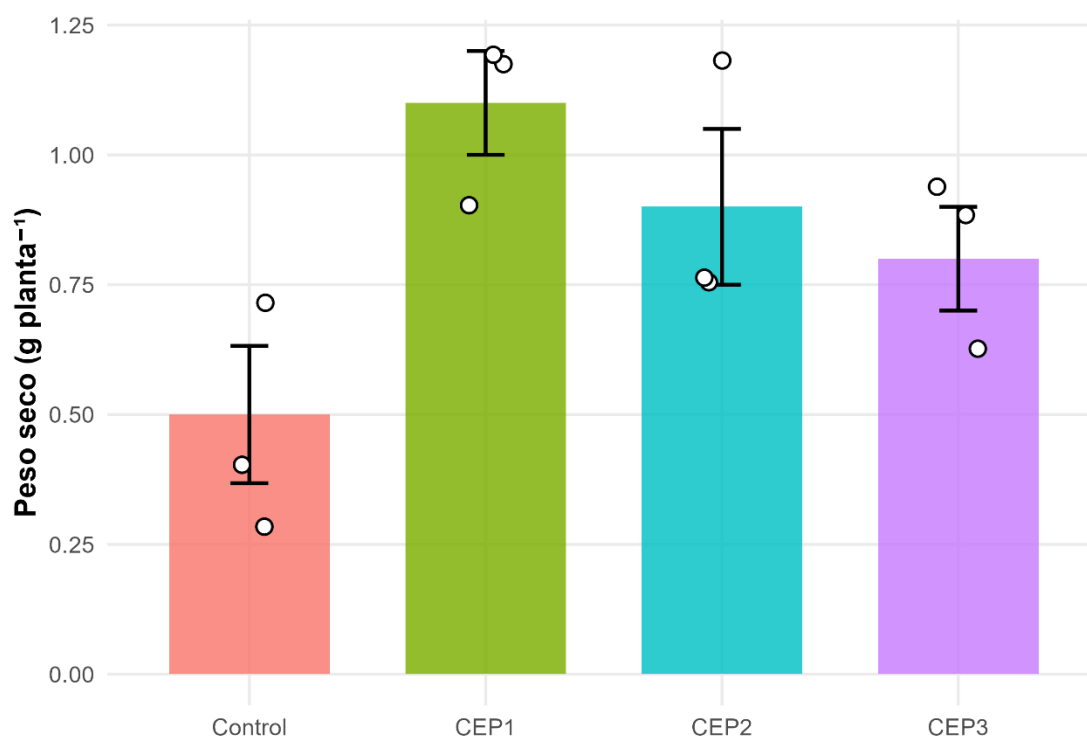


Figura 6. Biomasa seca radical de plantas de tomate inoculadas con *Meloidogyne incognita* y tratadas con diferentes cepas de *Purpureocillium lilacinum* bajo condiciones controladas. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$), mientras que los puntos corresponden a las observaciones individuales de cada repetición. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Eficacia biocontroladora de las cepas

La eficacia biocontroladora de las cepas de *P. lilacinum* se evidenció mediante la reducción porcentual de la formación de agallas y de la población de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* respecto al tratamiento control infestado (Figura 7). La cepa CEP1 presentó el mayor nivel de supresión del nematodo, con reducciones del 93.9 % en el número de agallas y del 89.8 % en la población de juveniles J2. Por su parte, CEP2 registró reducciones del 79.9 % y 67.9 % para agallas y J2, respectivamente, mientras que CEP3 alcanzó reducciones del 80.3 % en la formación de agallas y del 77.6 % en la población de juveniles. En términos generales, todas las cepas evaluadas redujeron significativamente el desarrollo y la reproducción de *M. incognita*; sin embargo, CEP1 mostró el mayor potencial biocontrolador al presentar los mayores porcentajes de supresión para ambas variables.

La acción de *P. lilacinum* sobre estas dos variables puede explicarse por la convergencia de varios mecanismos. En primer lugar, el parasitismo de huevos y masas de huevos reduce la eclosión y, por tanto, limita la generación de nuevos juveniles infectivos (Moosavi, 2024). Este proceso está mediado por la adhesión de las hifas a la superficie

del huevo, la penetración mecánica y la secreción de enzimas hidrolíticas, como quitinasas, proteasas y lipasas, que degradan la matriz estructural de sus cubiertas protectoras (Rajendran et al., 2024).

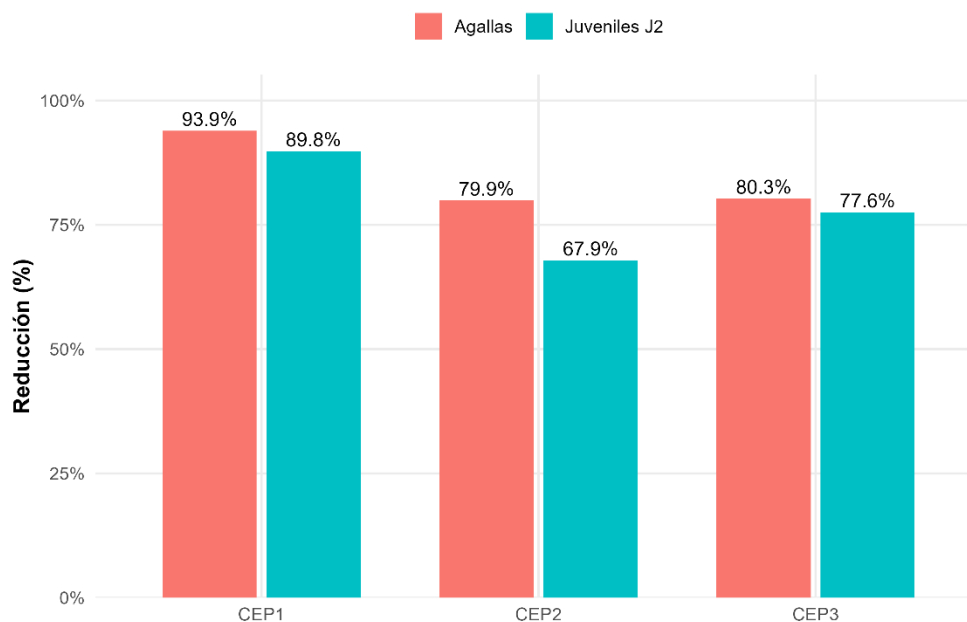


Figura 7. Reducción porcentual de la formación de agallas y de la población de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* en plantas de tomate tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum*, en comparación con el tratamiento control infestado. Los porcentajes se calcularon con base en los valores medios de cada tratamiento respecto al control.

Análisis de correlación

El análisis de correlación evidenció relaciones significativas entre las variables evaluadas (Figura 8). La formación de agallas presentó una correlación positiva con la población de juveniles de segundo estadio (J2) en el suelo ($r = 0.68$), indicando que un mayor establecimiento del nematodo en las raíces estuvo asociado con una mayor densidad de juveniles en el suelo. En contraste, el número de agallas mostró correlaciones negativas con la colonización del sistema radical ($r = -0.67$), la colonización del suelo ($r = -0.67$) y la biomasa fresca radical ($r = -0.65$), lo que sugiere que una mayor capacidad de establecimiento de *P. lilacinum* se asoció con una reducción de la infección y un mejor desarrollo del sistema radical.

Las correlaciones negativas entre la formación de agallas y la colonización radical o del suelo por *P. lilacinum* pueden explicarse por la capacidad del hongo para interferir con diferentes etapas del ciclo del nematodo (Vilela et al., 2025). La colonización de la rizósfera incrementa el contacto entre el hongo, los huevos y los juveniles infectivos, favoreciendo el parasitismo directo y la exposición a enzimas hidrolíticas y metabolitos con actividad nematocida. Al mismo tiempo, la ocupación de nichos ecológicos alrededor de la raíz puede limitar el acceso de los J2 a los sitios de penetración y reducir la probabilidad de establecimiento en el tejido vascular (Patidar et al., 2026).

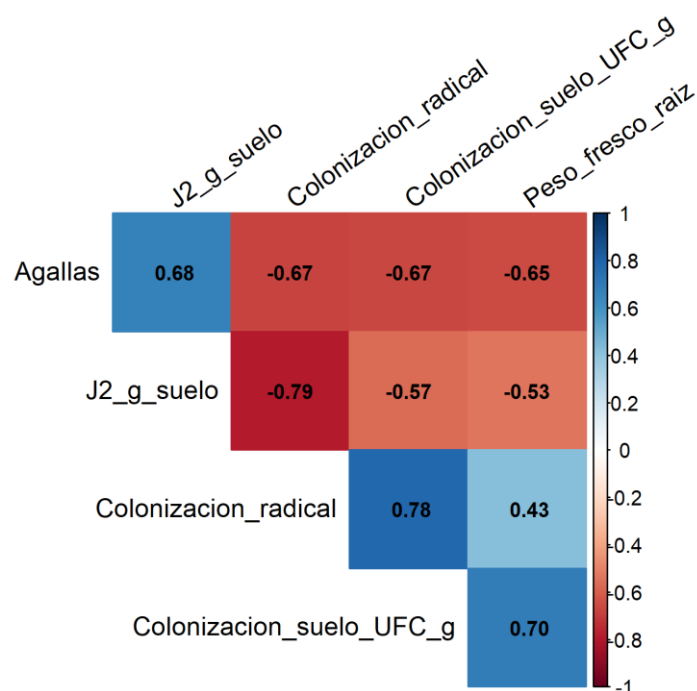


Figura 8. Matriz de correlación de Pearson entre las variables nematológicas, microbiológicas y agronómicas evaluadas en plantas de tomate inoculadas con *M. incognita* y tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum*. Los valores dentro de cada celda representan el coeficiente de correlación (r). Los tonos azules indican correlaciones positivas, mientras que los tonos rojos representan correlaciones negativas; la intensidad del color es proporcional a la magnitud del coeficiente.

Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA) permitió resumir la variabilidad de las variables nematológicas, microbiológicas y agronómicas evaluadas en las plantas de tomate tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum* (Figura 9). Los dos primeros componentes principales explicaron el 91.9 % de la variación total del conjunto de datos, correspondiendo el 78.5 % al primer componente (Dim1) y el 13.4 % al segundo componente (Dim2). Esta elevada proporción de variabilidad explicada indica que el modelo representa adecuadamente las relaciones entre las variables evaluadas.

El primer componente (Dim1) separó claramente el tratamiento control de las cepas de *P. lilacinum*. El tratamiento control se ubicó en el lado positivo del eje, asociado principalmente con un mayor número de agallas y una mayor población de juveniles J2 en el suelo, mientras que las cepas CEP1, CEP2 y CEP3 se agruparon en el lado negativo, relacionadas con una mayor colonización del sistema radical, una mayor colonización del suelo y un mayor peso fresco de raíces. Esta distribución evidencia un efecto antagonista de las cepas de *P. lilacinum* sobre *M. incognita*, acompañado de una mejora en el desarrollo del sistema radical.

Entre las cepas evaluadas, CEP1 mostró una agrupación más estrecha y una mayor asociación con las variables de colonización radical y biomasa fresca de raíces, lo que coincide con los resultados obtenidos en los análisis univariados. CEP2 presentó una mayor dispersión entre repeticiones, mientras que CEP3 mostró una posición intermedia, indicando una respuesta biológica consistente, pero de menor magnitud que

CEP1. En conjunto, el PCA confirma que el establecimiento de *P. lilacinum* estuvo estrechamente relacionado con la reducción de la infección por *M. incognita* y con una mejora del crecimiento radical de las plantas de tomate.

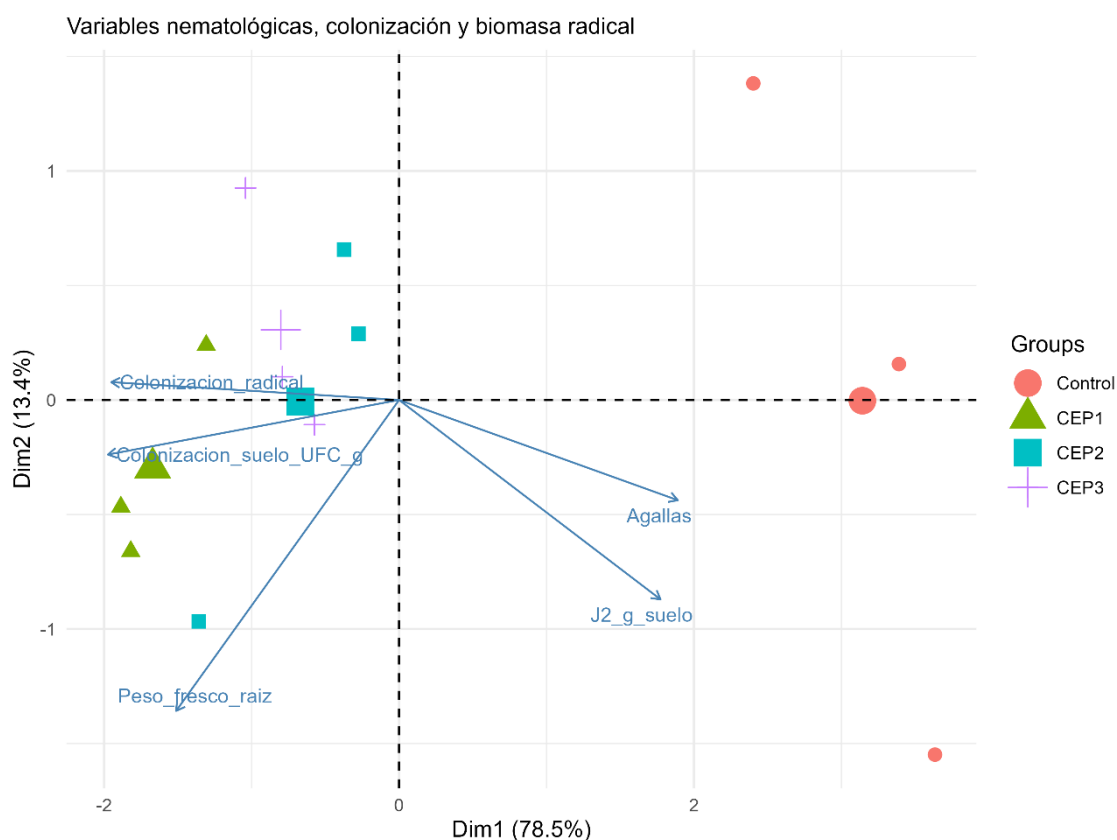


Figura 9. Análisis de componentes principales (PCA) de las variables nematológicas, microbiológicas y agronómicas evaluadas en plantas de tomate inoculadas con *M. incognita* y tratadas con diferentes cepas de *P. lilacinum*. Los puntos representan las repeticiones experimentales de cada tratamiento, mientras que las flechas indican la dirección y magnitud de la contribución de cada variable a los dos primeros componentes principales. Dim1 y Dim2 explicaron el 78.5 % y 13.4 % de la variación total, respectivamente.

Relación entre la colonización del sistema radical

La relación entre la colonización del sistema radical por *P. lilacinum* y la formación de agallas mostró una tendencia inversa (Figura 10). Las plantas del tratamiento control, caracterizadas por la ausencia de colonización radical, presentaron el mayor número de agallas por planta. En contraste, las plantas inoculadas con las diferentes cepas de *P. lilacinum* alcanzaron porcentajes de colonización radical entre 44 % y 81 %, acompañados de una marcada reducción en la formación de agallas. Particularmente, la cepa CEP1 combinó una elevada colonización radical con el menor número de agallas, mientras que CEP2 y CEP3 presentaron un comportamiento intermedio. En conjunto, estos resultados respaldan la existencia de una asociación negativa entre el establecimiento del hongo en el sistema radical y el desarrollo de *M. incognita*, en concordancia con el análisis de correlación obtenido para ambas variables ($r = -0.67$).

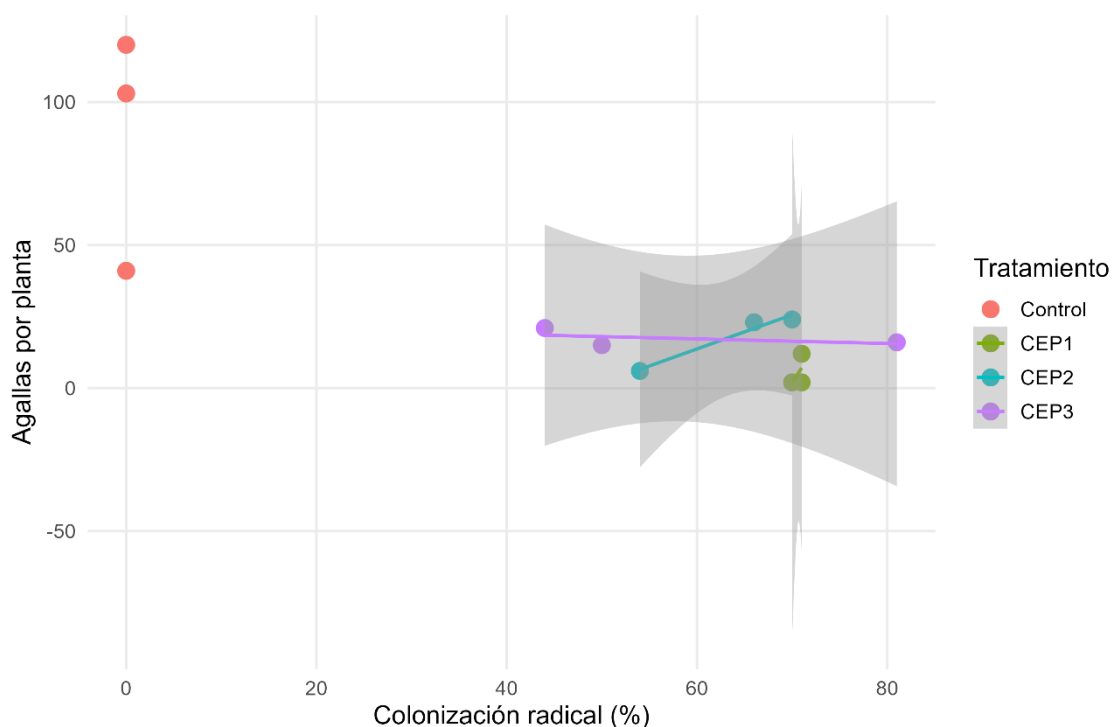


Figura 10. Relación entre la colonización del sistema radical por *P. lilacinum* y el número de agallas inducidas por *M. incognita* en plantas de tomate bajo condiciones controladas. Cada punto representa una repetición experimental ($n = 3$ por tratamiento). Los colores identifican los diferentes tratamientos evaluados.

Colonización del sistema radical

La colonización del sistema radical por *P. lilacinum* mostró una relación inversa con la densidad de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* en el suelo (Figura 11). Las plantas del tratamiento control, caracterizadas por la ausencia de colonización radical, presentaron las mayores densidades de juveniles. En contraste, las plantas inoculadas con las diferentes cepas de *P. lilacinum* registraron porcentajes de colonización radical entre 44 % y 81 %, acompañados de una disminución considerable en la población de J2. La cepa CEP1 presentó simultáneamente una elevada colonización radical y las menores densidades de juveniles, mientras que CEP2 y CEP3 mostraron valores intermedios. Esta tendencia coincide con el análisis de correlación, que evidenció una asociación negativa entre ambas variables ($r = -0.79$), indicando que un mayor establecimiento del hongo en el sistema radical estuvo asociado con una menor reproducción de *M. incognita* en el suelo.

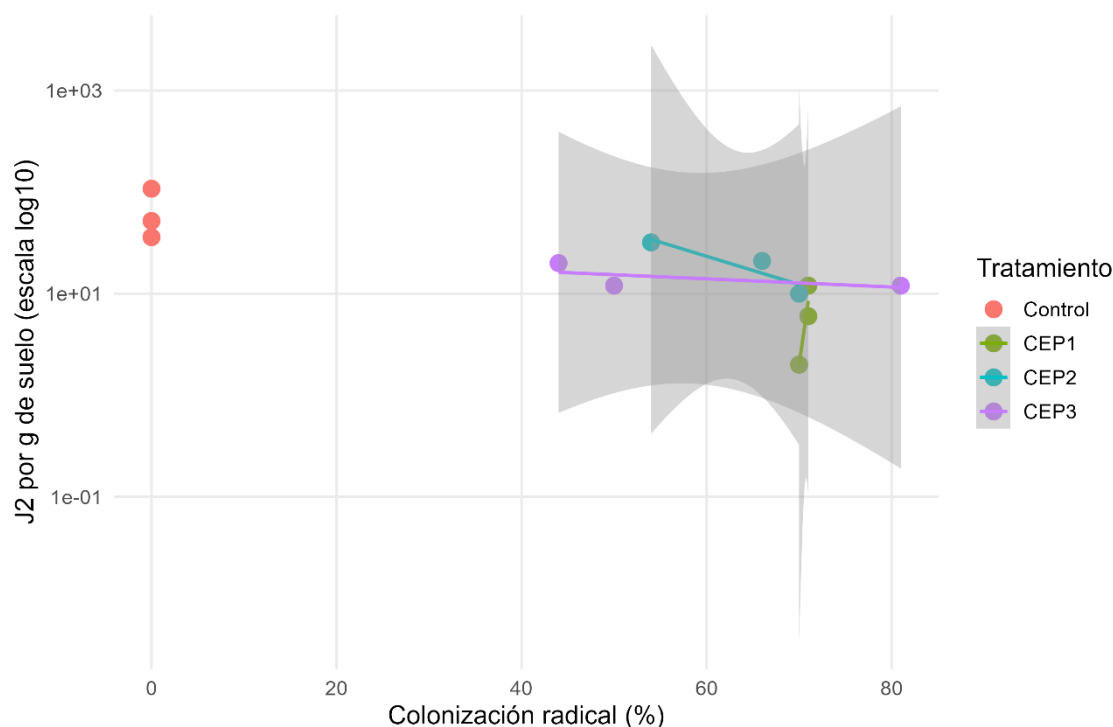


Figura 11. Relación entre la colonización del sistema radical por *P. lilacinum* y la densidad de juveniles de segundo estadio (J2) de *M. incognita* por gramo de suelo en plantas de tomate bajo condiciones controladas. Cada punto representa una repetición experimental ($n = 3$ por tratamiento). Los colores identifican los tratamientos evaluados y el eje Y se presenta en escala logarítmica ($\log_{10}$).

4. Conclusiones

Las cepas de *P. lilacinum* mostraron capacidad para reducir la infección y la reproducción de *M. incognita* en plantas de tomate, evidenciada por la disminución del número de agallas y de la población de juveniles J2 en el suelo. Entre los aislamientos evaluados, CEP1 presentó el mejor desempeño biocontrolador.

La colonización del sistema radical y del suelo por *P. lilacinum* se relacionó con una menor presión del nematodo y con un mayor desarrollo radical, lo que demuestra que su establecimiento en la rizósfera constituye un componente esencial de su eficacia como agente de control biológico bajo condiciones controladas.

Contribución de los autores: Conceptualización, J.E.N.-R. y M.A.M.A.; metodología, J.E.N.-R., M.A.M.A. y H.F.C.-M.; software, H.F.C.-M.; validación, O.O.P.-B.; análisis formal, J.E.N.-R. y H.F.C.-M.; investigación, J.E.N.-R., M.A.M.A., H.F.C.-M. y O.O.P.-B.; recursos, M.A.M.A. y O.O.P.-B.; curación de datos, H.F.C.-M.; redacción del borrador original, J.E.N.-R.; revisión y edición del manuscrito, M.A.M.A., H.F.C.-M. y O.O.P.-B.; visualización, H.F.C.-M.; supervisión, O.O.P.-B. Todos los autores han leído y aprobado la versión final publicada del manuscrito.

Financiamiento: La presente investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador, por el apoyo otorgado mediante su programa de becas, y a la Unidad de Posgrado de la

Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), por el respaldo académico e institucional brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses de carácter personal, profesional, institucional, académico o financiero que pudiera haber influido de manera inapropiada en el diseño, desarrollo, análisis, interpretación de los resultados o preparación del presente manuscrito. Asimismo, manifiestan que la investigación fue realizada con independencia y transparencia, y que no mantienen relaciones o compromisos que puedan afectar la objetividad, integridad o imparcialidad del trabajo presentado.

Referencias bibliograficas

- Abd-Elgawad, MMM (2024). Mejora de las estrategias para el control de plagas de nematodos en cultivos rentables. *Plants*, 13 (11), 1558. <https://doi.org/10.3390/plants13111558>
- Ali, A. A. I., Mahgoub, S. A., Ahmed, A. F., Mosa, W. F. A., El-Saadony, M. T., Mohamed, M. D. A., Alomran, M. M., Al-Gheffari, H. K., El-Tarabily, K. A., AbuQamar, S. F., & El-Ashry, R. M. (2024). Utilizing endophytic plant growth-promoting bacteria and the nematophagous fungus *Purpureocillium lilacinum* as biocontrol agents against the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on tomato plants. *European Journal of Plant Pathology*, 170(2), 417–436. <https://doi.org/10.1007/s10658-024-02907-z>
- Ansari, T., & Saleem, M. (2023). Nematodos fitoparásitos: una amenaza silenciosa para la producción agrícola y enfoques sostenibles para su manejo. En *Agricultura resiliente al clima, vol. 1* (págs. 799–819). Springer International Publishing.
- Azlay, L., El Boukhari, MEM, Mayad, EH y Barakate, M. (2022). Manejo biológico de nematodos agalladores (*Meloidogyne* spp.): una revisión. *Agricultura Orgánica*. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00417-y>
- Bell, C. A., Anifowose, A. A., & Wieczorek, K. (2026). Carbohydrate dynamics in plant-fungal-nematode networks: implications for stress resilience. *Frontiers in Plant Science*, 17(1825021), 1825021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1825021>
- Chen, L., & Liu, Y. (2024). The function of root exudates in the root colonization by beneficial soil rhizobacteria. *Biology*, 13(2), 95. <https://doi.org/10.3390/biology13020095>
- De Souza, T. A. F., Martins, L. M. V., Hungria, M., & Fernandes-Júnior, P. I. (2026). Survey of scientific production on bio-inputs in Northern and Northeastern Brazil (2010-2025): A focus on plant growth-promoting microorganisms in legumes and grasses. *Brazilian Journal of Microbiology*, 57(1). <https://doi.org/10.1007/s42770-026-01949-1>
- Elhady, A., Alghanmi, L., Abd-Elgawad, MMM, Heuer, H., Saad, MM, & Hirt, H. (2024). Investigación sobre nematodos fitoparásitos en paisajes desérticos áridos: una revisión sistemática de desafíos e intervenciones para superarlos. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1432311. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1432311>
- El-Marzoky, A. M., Ali, M. A. M. S., Elnahal, A. S. M., Abuljadayel, D. A., Alkherb, W. A. H., Moustafa, M., Alshaharni, M. O., & Abd El-Aal, E. M. (2025). The combination effect of *Purpureocillium lilacinum* strain (AUMC 10620) and avermectin (B1a and B1b) on control citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans* (Cobb) under laboratory and field conditions. *Biology*, 14(1), 60. <https://doi.org/10.3390/biology14010060>

- Girardi, NS, Sosa, AL, Etcheverry, MG, & Passone, MA (2022). Caracterización in vitro mediante bioensayos del hongo nematofágico *Purpureocillium lilacinum*: Evaluación del crecimiento, enzimas extracelulares, micotoxinas y supervivencia en el agroecosistema circundante del tomate. *Fungal Biology*, 126 (4), 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.02.001>
- Halshoy, H. S., Braim, S. A., & Hama, J. R. (2025). Phytohormonal regulation of root exudation: mechanisms and rhizosphere function. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), 2587486. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2587486>
- Khan, M., & Tanaka, K. (2023). *Purpureocillium lilacinum* for plant growth promotion and biocontrol against root-knot nematodes infecting eggplant. *PloS One*, 18(3), e0283550. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283550>
- Khan, MR (2023). Plagas de nematodos en cultivos agrícolas: una visión global. En *Aplicaciones biológicas y biotecnológicas novedosas en el manejo de nematodos en plantas* (págs. 3–45). Springer Nature Singapur.
- Moosavi, M. R. (2024). Egg-parasitic fungi and nematode management. En *Sustainability in Plant and Crop Protection* (pp. 207–235). https://doi.org/10.1007/978-3-031-52557-5_8
- Moreira, F. M., Machado, T. I., Torres, C. A. R., Souza, H. R. de, Celestino, M. F., Silva, M. A., Gomes, G. C., Cunha, B. B. D. R., Santos, P. de L. B. D., Carvalho Filho, M. R. de, Castro, M. T. de, & Monnerat, R. G. (2024). *Purpureocillium lilacinum* SBF054: Endophytic in *Phaseolus vulgaris*, *Glycine max*, and *Helianthus annuus*; Antagonistic to *Rhizoctonia solani*; and Virulent to *Euschiostoma heros*. *Microorganisms*, 12(6), 1100. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061100>
- Mwamula, A. O., Kabir, M. F., & Lee, D. (2022). A review of the potency of plant extracts and compounds from key families as an alternative to synthetic nematicides: History, efficacy, and current developments. *The Plant Pathology Journal*, 38(2), 53–77. <https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.12.2021.0179>
- Nagachandrabose, S., Shanthi, M., Shanmugam, S. P., Elaiyabharathi, T., Sharmila, R., Devrajan, K., Manickam, R., & Srinivasan, R. (2025). Integrating grafting and bio-inputs for sustainable management of root knot nematode, *Meloidogyne incognita*, in tomato cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 16(1623444), 1623444. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1623444>
- Parrado, L. M., & Quintanilla, M. (2024). Plant-parasitic nematode disease complexes as overlooked challenges to crop production. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1439951. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439951>
- Patidar, P., Prasad, L., Saharan, M. S., Bag, T. K., Singh, V. K., Sirohi, A., & Ghosh, A. (2026). Bioefficacy of various isolates of *Purpureocillium lilacinum* and *Paecilomyces variotii* against root-knot nematode and growth promotion in tomato. *Indian Phytopathology*. <https://doi.org/10.1007/s42360-026-00965-3>
- Penlap Tamagoua, J. J. (2026). *Ecophysiological modelling of plant-nematode interactions. Understanding the origins and consequences of differential plant susceptibility*. Agence Bibliographique de l'Enseignement Supérieur.
- Rajendran, J., Dubey, J., Kumar, V., & Sujayanand, G. K. (2024). Nematode egg parasitic fungus, *Purpureocillium lilacinum*: efficacy of indigenous strains for the management of *Meloidogyne incognita* in chickpea. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s41938-024-00769-5>

- Ren, B., Guo, X., Liu, J., Feng, G., Hao, X., Zhang, X., & Chen, Z. (2024). Auxin-mediated lateral root development in root galls of cucumber under *Meloidogyne incognita* stress. *Plants*, 13(19), 2679. <https://doi.org/10.3390/plants13192679>
- Rigobelo, E. C., Nicodemo, D., Babalola, O. O., & Desoignies, N. (2024). *Purpureocillium lilacinum* as an agent of nematode control and plant growth-promoting fungi. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 14(6), 1225. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061225>
- Rusique, L., Camacho, MJ, Serra, C., Nóbrega, F., & Inácio, ML (2023). Evaluación de nematodos formadores de agallas: identificación de especies, distribución y nuevos registros de hospedadores en Portugal. *Frontiers in Plant Science* , 14 , 1230968. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1230968>
- Sun, L., Lian, L., Yang, R., Li, T., Yang, M., Zhao, W., Huang, H., & Wang, S. (2024). Sugar delivery at the tomato root and root galls after *Meloidogyne incognita* infestation. *BMC Plant Biology*, 24(1), 451. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05157-7>
- Tapia-Vázquez, I., Montoya-Martínez, AC, De Los Santos-Villalobos, S., Ek-Ramos, MJ, Montesinos-Matías, R., & Martínez-Anaya, C. (2022). Nematodos de agallas (*Meloidogyne* spp.): una amenaza para la agricultura en México: biología, estrategias de control actuales y perspectivas. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* , 38 (2), 26. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03211-2>
- Vilela, R. M. I. F., Kuster, V. C., de Souza, A. A., Martini, V. C., Magalhães, T. A., Dos Santos Isaias, R. M., & de Oliveira, D. C. (2025). Effects of *Meloidogyne incognita* on agronomic parameters and structural changes in eggplant (*Solanum gilo* Raddi) roots treated with *Purpureocillium lilacinum*. *Plant Biology (Stuttgart, Germany)*, plb.70165. <https://doi.org/10.1111/plb.70165>
- Walia, RK y Khan, MR (2023). Nematodos formadores de agallas en las raíces (*Meloidogyne* spp.). En *Enfermedades de agallas en las raíces de plantas hortícolas* (págs. 1–60). Springer Nature Singapur.