Hacia una Agricultura Sostenible: El Papel del Control Biológico en el Manejo de Nematodos Fitoparásitos

Elena Flor Peregrín – Universidad de Granada 0000-0001-7780-5024
Ana Isabel García López – Universidad de Granada 0000-0002-3053-9432
Luis Fernando García del Moral – Universidad de Granada 0000-0002-0533-2915
Eva G. Martos Núñez – Universidad de Granada 0000-0002-1426-3595
Vanessa Martos Núñez – Universidad de Granada 0000-0001-6442-7968

Recepción: 12.11.2026 | Aceptado: 24.11.2026

Correspondencia a través de **ORCID**: Elena Flor-Peregrín **0000-0001-7780-5024**

Citar: Flor-Peregrín, E, García López, AI, García del Moral, LF, Martos Núñez, EG, & Martos Núñez, V (2026). Hacia una Agricultura Sostenible: El Papel del Control Biológico en el Manejo de Nematodos Fitoparásitos. *REIDOCREA, 15*(71), 964-970.
Financiación: Artículo financiado por el proyecto Horizonte Europa "AEROMATICS – Aeroponic Module Prototyping leveraging AI, Techno-economics & Sustainability". GA.101299984.
Área o categoría del conocimiento: Agricultura didáctica

Resumen: Los nematodos fitoparásitos representan un desafío complejo para la producción mundial agrícola, ya que provocan severas pérdidas económicas. Frente a la progresiva restricción de nematicidas sintéticos, por los problemas sanitarios y medioambientales que desencadenan, el control biológico surge con una alternativa sostenible y viable. Esta revisión analiza los principales mecanismos fisiológicos y moleculares involucrados en la interacción entre la planta, el nematodo y el agente de biocontrol (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, hongos y nematodos entomopatógenos). Los resultados indican que el biocontrol actúa mediante antagonismo directo, modulando el sistema inmune de la planta hospedadora y favoreciendo su crecimiento. La colonización por microorganismos beneficiosos desencadena un estado de sensibilización o priming que activa las rutas de señalización del ácido jasmónico, etileno y ácido salicílico, reforzando la pared de las células vegetales y evitando la formación de células gigantes en los sitios de alimentación del nematodo. Asimismo, la integración del biocontrol en el currículo académico refuerza la comprensión de la inmunidad vegetal y activa el pensamiento crítico hacia la instauración de una agricultura sostenible.

Palabra clave: Biocontrol

Towards Sustainable Agriculture: The Role of Biological Control in Plant-Parasitic Nematode Management in Plant Physiology Teaching

Abstract: Plant-parasitic nematodes represent a complex challenge to global agricultural production, causing severe economic losses. Given the increasing restrictions on synthetic nematicides—due to the health and environmental problems they trigger—biological control has emerged as a sustainable and viable alternative. This review examines the main physiological and molecular mechanisms involved in the interaction between the plant, the nematode, and the biocontrol agent (including plant growth-promoting rhizobacteria, fungi, and entomopathogenic nematodes). The findings indicate that biocontrol functions through direct antagonism, modulation of the host plant's immune system, and the promotion of plant growth. Colonization by beneficial microorganisms induces a state of sensitization or *priming* that activates the signaling pathways of jasmonic acid, ethylene, and salicylic acid, reinforcing plant cell walls and preventing the formation of giant cells at the nematode's feeding sites. Furthermore, integrating biocontrol into academic curricula enhances the understanding of plant immunity and fosters critical thinking regarding the implementation of sustainable agriculture.

Keyword: Biocontrol

Introducción

Los nematodos fitoparásitos suponen una gran amenaza mundial para la producción agrícola, ya que son capaces de infectar un amplio rango de cultivos y causar pérdidas de productividad y económicas relevantes. Según la Sociedad Americana de Fitopatología, se estima que estas pérdidas en agricultura representan el 14% de la productividad mundial, lo que supone aproximadamente 125.000 millones de dólares al

año (Chitwood, 2003). Los nematodos agalladores o especies del género *Meloidogyne* (especialmente *M. incognita*) son los responsables de la reducción de la productividad hasta en un 60% en cultivos de tomate, pimiento y soja entre otros. Por su parte, los nematodos formadores de quistes (*Heterodera* spp. y *Globodera spp.)*, causan pérdidas de entre el 30 y el 80% en patata y soja. La mayoría de estas pérdidas agrícolas se relacionan con su proceso de alimentación, ya sea por sí mismos o por ser vectores de otros patógenos.

Los síntomas y efectos que ocasionan suelen ser subestimados al ser inespecíficos y comunes a otros problemas, confundiéndose habitualmente con deficiencias nutricionales, estrés hídrico, problemas de fertilidad edáfica o enfermedades infecciosas (tabla 1). Como consecuencia, suelen aplicarse medidas innecesarias como el aumento del riego o la fertilización excesiva, que pueden incluso agravar el problema nematológico.

Tabla 1.
Sintomatología asociada a la infestación por nematodos fitoparásitos.

Sistema radical o daño primario	Parte aérea o daño secundario
Agallas (Meloidogyne spp.)	Crecimiento reducido y atrofiado
Lesiones necróticas (Pratylenchus spp.)	Clorosis
Quistes (g. Heterodera spp. Globodera spp.)	Marchitamiento
Sistema radicular pobre	Reducción del vigor y la producción
Pudrición radicular	Manchas foliares necróticas

Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, la infestación ocasionada por *Meloidogyne* spp. altera severamente el funcionamiento metabólico y vascular del cultivo hospedador. En los sitios de alimentación, el nematodo provoca la aparición de células gigantes e induce la formación de agallas radiculares que desorganizan el sistema vascular, interfiriendo en la absorción eficiente de agua y nutrientes (Meidani *et al*., 2019). Todo ello desencadena un estrés hídrico secundario, déficit nutricional, disminución de la fotosíntesis y alteración del equilibrio fitohormonal (especialmente de auxinas, citoquininas y ácido abscísico). Paralelamente, la planta activa rutas de defensa mediadas por el ácido salicílico y el ácido jasmónico / etileno, convirtiendo este pato-sistema en un modelo biológico idóneo para estudiar la señalización metabólica y el estrés biótico.

Tradicionalmente, el manejo de estos nematodos se ha basado en el uso excesivo de fumigantes del suelo y nematicidas sintéticos de amplio espectro. Sin embargo, su elevado riesgo medioambiental, la toxicidad asociada, la retirada progresiva de materias activas y las restricciones normativas han dirigido los esfuerzos hacia la búsqueda de alternativas sostenibles. Entre ellas destacan los agentes de biocontrol (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal o PGPR, hongos y nemátodos entomopatógenos), los cuales actúan frente a los nematodos fitoparásitos y, además, estimulan el crecimiento vegetal e inducen la defensa natural de la planta.

A pesar de estos avances, aún existe una brecha entre la investigación, la aplicación y su transferencia a la docencia universitaria. La integración del control biológico en Fisiología Vegetal permite conectar conceptos fundamentales de inmunidad, vascularización, metabolismo vegetal y agricultura sostenible.

Objetivo

Evaluar los principales agentes de biocontrol frente a nematodos fitoparásitos e identificar sus mecanismos de acción y su efecto en la respuesta fisiológica de la planta,

con el propósito de implementar la docencia en fisiopatología dentro del ámbito de la fisiología vegetal.

Método

La selección bibliográfica se realizó fundamentalmente en las bases de datos internacionales Scopus, Elsevier (disponible en https://scopus.com) y Web of Science, Clarivate (WoS) (disponible en https://webofscience.com) mediante la formulación de descriptores basados en tres bloques conceptuales (organismo diana, mecanismo de biocontrol y dimensión didáctica). Fueron considerados artículos originales, revisiones de alto impacto y capítulos de libros en español e inglés, priorizando las publicaciones más recientes. Los criterios de inclusión exigieron que los trabajos estudiaran los mecanismos fisiológicos de acción de los microorganismos o su potencial en el manejo sostenible de cultivos. Además, se excluyeron estudios centrados exclusivamente en nematicidas de síntesis química o que carecieran de potencial docente. Finalmente, la información obtenida se trató con un enfoque pedagógico para su uso como recurso docente en el aula universitaria.

Resultados

En la tabla 2 se encuentran resumidas las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal más efectivas contra los diferentes nematodos fitoparásitos y sus principales mecanismos de acción. Además del efecto directo sobre el patógeno, la colonización radicular por las PGPR desencadena cambios fisiológicos determinantes en la planta (vía indirecta):

- Inducción de resistencia sistémica inducida (RSI) regulada por las vías de señalización del ácido jasmónico (JA) y etileno (ET) que, conjuntamente, promueven la producción de compuestos fenólicos, refuerzan las paredes celulares y optimizan el cierre de las estomas.
- Incremento en la actividad enzimática (peroxidasa, polifenoloxidasa y fenilalanina amonio-liasa) y en la producción de fitoalexinas, lo que origina una reducción del estrés oxidativo derivado de la infestación.
- Promoción del crecimiento radicular mediante la síntesis de ácido indolacético (AIA), solubilización de fosfatos y producción de sideróforos, ayudando a restaurar la absorción de agua y nutrientes en el cultivo afectado por el patógeno (efecto compensatorio).

Tabla 2.
Principales agentes bacterianos y su mecanismo de acción frente a nematodos fitoparásitos.

AGENTES BACTERIANOS		
Bacteria	Nematodo	Mecanismo
Bacillus spp.[a]	Aphelenchoides besseyi	Inducción de estrés oxidativo severo mediante compuestos orgánicos volátiles. Exoenzimas hidrolíticas (proteasas, quitinasas, glucanasas): alteran la permeabilidad de la cubierta del huevo. Producción de sulfuro de hidrógeno: efecto nematicida.
Bacillus thuringiensis[a]	Bursaphelenchus xylophilus Meloidogyne incognita	Producción de proteínas cristal: daño en órganos internos, especialmente a nivel intestinal.
Pseudomonas simiae[b]	Meloidogyne incognita	Exoenzimas hidrolíticas (proteasas, quitinasas, glucanasas): alteran la permeabilidad de la cubierta del huevo. Liberación de cianuro de hidrógeno (efecto nematicida) y acción repelente (desorientación en la búsqueda de raíces).

Serratia ureilytica[c]	Nacobbus aberrans	Producción de biosurfactantes, toxinas y enzimas: efecto sobre la estructura del nematodo.
Pseudomonas fluorescens[b]	Globodera rostochiensis	Metabolito secundario: 2,4-diacetilfloroglucinol (efecto negativo sobre la movilidad de juveniles y la eclosión de huevos).
Bacillus firmus[a]	Meloidogyne spp.	Producción de bacteriocinas.
Burkholderia cepacia[d]	Meloidogyne incognita	Metabolitos secundarios nematicidas.
Pasteuria penetrans[e]	Rotylenchulus reniformis	Penetra la cutícula del nematodo, se multiplica en el interior y finalmente lo destruye. Acoplamiento de los ciclos de la bacteria y el patógeno.
Paenibacillus polymyxa[f]	Meloidogyne spp.	Uso de trampas para atraer al nematodo y eliminarlo por contacto o fumigación.
Bacillus velezensis[a]	Meloidogyne incognita	Secreción de metabolitos secundarios que provocan daños intestinales en el nematodo
Streptomyces microflavus[g]	Pratylenchus penetrans	Producción de enzimas líticas y toxinas que afectan al sistema nervioso del nematodo.

a: Ali et al., 2023; Castillo et al., 2013; Hu et al., 2022. b: Sun et al., 2021. c: Wong-Villarreal et al., 2021. d: Meyer et al., 2000. e: Abd-Elgawad, M. (2024). f-g: Ayaz et al., 2024; Bhat et al., 2023; Pires et al., 2022.

En la tabla 3 se resumen los hongos más efectivos frente a nematodos fitoparásitos y sus principales mecanismos de acción.

Tabla 3.
Principales agentes fúngicos y su mecanismo de acción frente a nematodos fitoparásitos

AGENTES FÚNGICOS		
Hongo	Nematodo	Mecanismo
Volutella citrinella[a]	Aphelenchoides besseyi	Hifas del hongo con actividad nematicida por formación de anillos constrictores
Purpureocillium lilacinum[b]	Meloidogyne javanica Meloidogyne incognita Heterodera spp.	Parásito de formas sedentarias: huevos y hembras Penetración enzimática, destrucción de la masa de huevos y degeneración embrionaria Reducción de quistes
Pochonia chlamydosporia[c]	Meloidogyne incognita	Parásito de formas sedentarias: huevos y hembras. Ataque enzimático sobre la cubierta del huevo, posterior penetración de las hifas y destrucción del embrión antes de su eclosión o de las masas de huevos.
Trichoderma spp.[d]	Meloidogyne incognita	Competencia espacial y nutricional. Antibiosis: producción de metabolitos secundarios nematicidas, enzimas y toxinas. Parasitismo.
Beauveria bassiana[e]	Heterodera spp.	Secreción de enzimas y degradación de estructuras. Producción de metabolitos secundarios y toxinas. Efecto antibiótico y confusión.
Arthrobotrys oligospora[f] Monacrosporium spp.[g]	Meloidogyne incognita	Desarrollo de estructuras especializadas para capturar/inmovilizar nematodos: anillos de constricción, redes adhesivas tridimensionales, nudos, mucosidades pegajosas. Tras su captura, el hongo penetra la cutícula y se desarrolla en el interior del nematodo hasta consumirlo.
Penicillium chrysogenum[h]	Meloidogyne incognita	Producción de metabolitos secundarios y compuestos volátiles. Alteración quimiotáctica.
Hirsutella spp.[i]	Meloidogyne spp.	Adhesión de esporas y penetración enzimática. Producción de toxinas metabólicas.
Arbuscular mycorrhizae fungi (AMF)[j]	Meloidogyne spp.	Competencia espacial y dificultad de acceso a la raíz. Metabolitos nematicidas.

a: Zhang et al., 2021. b: Castillo et al., 2013; Kiriga et al., 2018. c: Ghahremani et al., 2019. d: Kiriga et al., 2018; Martínez-Medina et al., 2017; Meyer et al., 2000; Yan et al., 2021. e-j: Ayaz et al., 2024; Bhat et al., 2023; Pires et al., 2022.

A diferencia de las bacterias, que activan principalmente la vía de RSI, la interacción con estos hongos (especialmente *Trichoderma* spp. y AMF) puede desencadenar simultáneamente la vía del ácido salicílico (SA), asociada a la resistencia sistémica adquirida (RSA), originando una regulación cruzada para ajustar la defensa de la planta. Al mismo tiempo, la acumulación de estos compuestos en los tejidos vasculares frena el desarrollo de las células nutricionales o células gigantes inducidas por *Meloidogyne* spp., evitando la alimentación del nematodo y provocando su muerte por inanición.

Por otra parte, existe una compensación del estrés hídrico y nutricional, especialmente con la asociación mutualista de micorrizas, ya que estas expanden sus hifas aumentando la superficie de absorción de agua, fósforo y micronutrientes. Esto mitiga los síntomas de la enfermedad provocados por las agallas en el sistema vascular.

La tabla 4 esquematiza los nematodos entomopatógenos más efectivos frente a nematodos fitoparásitos y sus principales mecanismos de acción.

Tabla 4.
Principales nematodos entomopatógenos y su mecanismo de acción frente a nematodos fitoparásitos

NEMATODOS ENTOMOPATÓGENOS		
Hongo	Nematodo	Mecanismo
Steinernema spp.[a]	Meloidogyne spp. Globodera spp.	• Liberación de compuestos nematicidas por la bacteria asociada • Competición por el espacio rizosférico y por exudados radicales • Interferencia en el quimiotactismo (efecto repelente)
Heterorhabditis spp.[b]	Meloidogyne spp. Pratylenchus spp.	• Producción de toxinas y antibióticos por la bacteria simbiótica • Competición por el espacio

a, b: Del Valle et al., 2013; Bhat et al., 2023

Los nematodos entomopatógenos son conocidos por su efectividad frente a insectos; sin embargo, últimamente se estudia su papel en la rizosfera frente a nematodos fitoparásitos. El biocontrol ejercido por estos agentes se centra en mecanismos de competencia espacio-temporal y alelopatía:

- Interferencia en la orientación y penetración de *Meloidogyne* spp.:
  - Competencia espacial en la rizosfera.
  - Efecto repelente y perturbación del quimiotactismo: el nematodo fitoparásito detecta los exudados y el CO_2 de los nematodos entomopatógenos en el suelo, provocándoles una parálisis temporal y un desvío de la trayectoria hacia las raíces.
- Acción de las bacterias simbiontes presentes en el tubo digestivo de los nematodos entomopatógenos:
  - Liberación de metabolitos nematicidas y/o nematostáticos y antibióticos naturales
- Estimulación de las defensas vegetales mediante RSI.

Discusión

El control de nematodos fitoparásitos empleando microorganismos es un método eficaz y adecuado desde el punto de vista medioambiental; sin embargo, se necesita más investigación en este ámbito (Bhat *et al*., 2023). Estudios recientes han demostrado que *Bacillus* spp. o *Pseudomonas* spp. junto con la interacción de otras bacterias en la rizosfera, pueden producir componentes perjudiciales para los nematodos (Ali *et al*., 2023). Asimismo, ciertos agentes fúngicos están emergiendo como una fuente prometedora de compuestos nematicidas, bien mediante liberación de toxinas, de compuestos orgánicos volátiles, de enzimas o de diversos metabolitos secundarios (Pires *et al*., 2022). El análisis de estas medidas manifiesta que la protección sostenible

de los cultivos no depende de un único mecanismo de acción, sino de una compleja red de interacciones en el entorno rizosférico del suelo.

Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, resulta relevante la modulación diferencial del sistema inmune de la planta. Tradicionalmente se ha aceptado que la resistencia sistémica adquirida actúa preferentemente frente a patógenos biotrofos, mientras que la resistencia sistémica inducida responde frente a necrotrofos y herbívoros. En el caso de *Meloidogyne* spp., que establece una relación compleja a través de las células gigantes, puede darse la activación coordinada de ambas vías por ciertos hongos como en algunas especies de *Trichoderma* (Martínez-Medina *et al*., 2017).

A pesar de los prometedores resultados mostrados, existen limitaciones en condiciones de campo o invernadero, ya que la eficacia de los agentes de biocontrol suele fluctuar, y en muchos casos reducirse, puesto que la microbiota autóctona del suelo ejerce resistencia a la invasión, limitando el acceso del agente introducido. También influyen los fatores abióticos, debido a que la temperatura, la humedad, el pH y el contenido en materia orgánica del suelo condicionan la supervivencia de esporas e hifas y la estabilidad enzimática.

Conclusiones

Los nematicidas derivados de microorganismos proporcionan una solución aceptable medioambientalmente para el manejo de los nematodos fitoparásitos. Estos productos biológicos reducen las infestaciones, promueven la salud del suelo y contribuyen a la producción agroecológica. La integración de distintos mecanismos de acción, desencadenando un estado de sensibilización que activa las defensas de la planta, enlaza los cambios sufridos en la raíz cuando la planta es infestada, el metabolismo secundario y la inmunidad vegetal, combinado con la agricultura sostenible. Para maximizar estos avances es necesario seguir profundizando en la interacción planta-nematodo-agente de biocontrol bajo condiciones variables de campo y laboratorio.

Referencias

Abd-Elgawad, M (2024). Pasteuria species for nematodes management in organic farms. En Sustainable Management of Nematodes in Agriculture: Role of Microbes-Assited Strategies (págs. 89-126). KK Chaud, MK Meghvansi, S Siddiqui.

Ali, Q, Yu, C, ..., & Zhao, X. (2023). High killing rate of nematode and promotion of rice growth by synthetic volatiles from Bacillus strains due to enhanced oxidative stress response. Physiologia Plantarum, 175(1): e13868. https://doi.org/10.1111/ppl.13868

Ayaz, M, Zhao, JT, …, & Huang, WK (2024). Biocontrol of plant parasitic nematodes by bacteria and fungi: a multi-omics approach for the exploration of novel nematicides in sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 15: 1433716. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1433716

Bhat, A, Shakeel, A, ..., & Khan, A. (2023). Microbes vs. nematodes: Insights into biocontrol through antagonistic organisms to control root-knot nematodes. Plants, 12(3): 451. https://doi.org/10.3390/plants12030451

Castillo, J, Lawrence, K, & Kloepper, J (2013). Biocontrol of the reniform nematode by Bacillus firmus GB-126 and Paecilomyces lilacinus 251 on cotton. Plant Disease, 97: 967-676. https://doi.org/10.1094/pdis-10-12-0978-re

Chitwood, D (2003). Research on plant-parasitic nematode biology conducted by the United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service. Pest Management Science, págs. 59: 748-753. https://doi.org/10.1002/ps.684

Del Valle, E, Lax, P, …, & Doucet, M (2013). Effects of insect cadavers infected by Heterorhabditis bacteriophora and Steinernema diaprepesi on Meloidogyne incognita parasitism in pepper and summer squash plants. Ciencia e Investigación Agraria, 40(1): 109-118. https://doi.org/10.4067/S0718-16202013000100009

Ghahremani, Z, Escudero, N, ..., & Sorribas, F (2019). Pochonia chlamydosporia induces plant-dependent systemic resistence to Meloidogyne incognita. Frontiers in Plant Science, 10: 457876. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00945

Hu, Y, You, J, ..., & Pan, F (2022). Biocontrol efficacy of Bacillus velezensis strain YS-AT-DS1 against the root-knot nematode Meloidogyne incognita in tomato plants. Frontiers in Microbiology, 13: 1035748. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1035748

Kiriga, A, Haukeland, S, ..., & Beek, N (2018). Effect of Trichoderma spp. and Purpureocillium lilacinum on Meloidogyne javanica in commercial pineapple production in Kenya. Biological Control, 119: 27-32. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.01.005

Martínez-Medina, A, Fernández, I, ..., & Van Wees, S (2017). Shifting from priming of salicylic acid-to jasmonic acid-regulated defences by Trichoderma protects tomato against the root knot nematode Meloidogyne incognita. New Phytologist, 213: 1363-1377. https://doi.org/10.1111/nph.14251

Meidani, C, Ntalli, N, ..., & Ioannis-Dimosthenis, A (2019). Cell Wall Modifications in Giant Cells Induced by the Plant Parasitic

Nematode Meloidogyne incognita in Wild-Type (Col-0) and the fra2 Arabidopsis thaliana Katanin Mutant. International Journal of Molecular Sciences, 20(21): 5465. https://doi.org/10.3390/ijms20215465

Meyer, S, Massoud, S, ..., & Roberts, D (2000). Evaluation of Trichoderma virens and Burkholderia cepacia for antagonistic activity against root-knot nematode, Meloidogyne incognita. Nematology, 2: 871-879. https://doi.org/10.1163/156854100750112815

Pires, D, Vicente, C, ..., & Inácio, M (2022). The fight against plant-parasitic nematodes: current status of bacterial and fungal biocontrol agents. Pathogens, 11(10): 1178. https://doi.org/10.3390/pathogens11101178

Sun, X., Zhang, R., ..., & Li, L. (2021). Biocontrol of the root-knot nematode Meloidoogyne incognita by a nematicidal bacterium Pseudomonas simiae MB751 with cyclic dipeptide. Pest Management Science, 4365-4374. https://doi.org/10.1002/ps.6470

Wong-Villarreal, A, Méndez-Santiago, A, ..., & García-Maldonado, J (2021). Nematicidal activity of the endophyte Serratia ureilytica against Nacobbus aberrans in chili plants (Capsicum annuum L.) and identification of genes related to biological control. Plants, 10: 2655. https://doi.org/10.3390/plants10122655

Yan, Y, Mao, Q, ..., & Yang, Z. (2021). Trichoderma harzianum induces resistance to root-knot nematodes by increasing secondary metabolite synthesis and defense-related enzyme activity in Solanum lycopersicum L. Biological Control, 158: 104609. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104609

Zhang, X, Zhang, H, ..., & Wang, Y (2021). A new strain of Volutella citrinella with nematode predation and nematicidal activity, isolated from the cysts of potato cyst nematodes in China. BMC Microbiology, 21: 323. https://doi.org/10.1186/s12866-021-02385-x