

Nematodos entomopatógenos: una alternativa biotecnológica para el control sostenible de plagas en la agricultura

Gobinath Chandrakasan^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

* Dirección para correspondencia: gobi.marine@gmail.com

Los nematodos entomopatógenos (NEP) son aliados naturales en el control biológico de plagas, gracias a su relación simbiótica con bacterias que eliminan insectos dañinos. A diferencia de los nematodos fitoparásitos (que atacan plantas), los NEP son beneficiosos para la agricultura y la horticultura, ya que destruyen plagas sin afectar a las plantas, a los seres humanos ni a otros animales.

El control sostenible de plagas agrícolas es esencial para garantizar la producción de alimentos y proteger el medio ambiente. En este contexto, los NEP destacan como una herramienta biotecnológica prometedora dentro del manejo agroecológico. Estos diminutos organismos del suelo infectan y eliminan insectos dañinos mediante una simbiosis con bacterias entomopatógenas, sin afectar la biodiversidad ni la salud humana. Además, su aplicación es sencilla y segura, lo que facilita su uso en distintos sistemas agrícolas. Los NEP representan así una alternativa ecológica y eficaz que impulsa una agricultura más limpia y sostenible.

En el panorama agrícola de México, los NEP representan una herramienta biotecnológica en pleno auge para el control sostenible de plagas. Estos organismos, aliados naturales de los cultivos, han mostrado una eficacia notable contra insectos de importancia económica como *Spodoptera frugiperda* (gusano

cogollero del maíz), *Diabrotica virgifera* (gusano de la raíz del maíz) y *Phyllophaga* spp. (gallina ciega), entre otros.

La adopción de estrategias biológicas reduce el uso de agroquímicos y fortalece la transición hacia modelos agrícolas sostenibles, en armonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las políticas de mitigación del cambio climático. Este trabajo ofrece una revisión sobre la biología de los NEP, sus mecanismos de infección, su importancia ecológica, sus aplicaciones actuales y su relevancia como herramienta de interés para el diseño e implementación de políticas públicas en el sector agrícola (Pacheco Hernández *et al.*, 2019).

Biología de los NEP

Los NEP son parásitos obligados de insectos y presentan un ciclo de vida complejo que abarca varias etapas de desarrollo: huevo, juvenil y adulto. La fase juvenil infecciosa (JI) constituye la única etapa de vida libre, encargada de localizar e infectar al hospedador. Estas JI utilizan quimiotaxis para detectar señales emitidas por los insectos y penetran en su organismo a través de aberturas naturales como la boca, los espiráculos o el ano, aunque también pueden atravesar directamente la cutícula. Una vez dentro del hospedador, los NEP liberan bacterias simbióticas alojadas en su intestino hacia el hemocoele del insecto. El hemocoele es la cavidad corporal principal de muchos invertebrados, llena de hemolinfa, un fluido similar a la

sangre que baña y rodea los órganos internos directamente en lugar de circular a través de vasos sanguíneos.

Las especies del género *Steinernema* están asociadas con bacterias del género *Xenorhabdus*, mientras que las del género *Heterorhabditis* (Figura 1) se asocian con *Photorhabdus*. Estas bacterias se multiplican rápidamente, provocando septicemia y la muerte del hospedador en un lapso de 24 a 48 horas. Tras la muerte del insecto, los nematodos se alimentan de los tejidos en descomposición y completan varios ciclos reproductivos dentro del cadáver. Como resultado, se generan miles de nuevas juveniles infectivas que emergen del cuerpo del hospedador muerto para reiniciar el ciclo en nuevos insectos. Los NEP se han adaptado a una amplia gama de condiciones ambientales y presentan distintos niveles de especificidad hacia sus hospedadores.

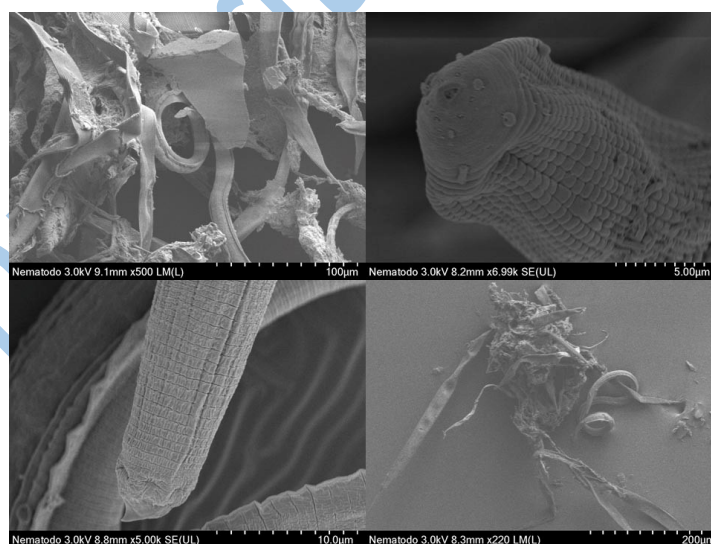


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de *Heterorhabditis bacteriophora*. El nematodo fue obtenido mediante el procesamiento de muestras de suelo y la extracción de NEP utilizando *Galleria mellonella* como organismo trampa.

Algunas especies, como *S. carpocapsae*, adoptan una estrategia de depredación por emboscada, permaneciendo cerca de la superficie del suelo en espera de que pase un hospedador. Otras, como *H. bacteriophora*, actúan como cazadoras activas, desplazándose en el perfil del suelo en busca de presas (Grunseich *et al.*, 2021). Su supervivencia y eficacia están influenciadas por factores como la humedad del suelo, la temperatura y la disponibilidad de hospedadores.

Mecanismos de infección de los NEP

El proceso de infección de los NEP es una secuencia precisa que inicia con la búsqueda del huésped y culmina con su muerte y la reproducción del nematodo.

Las JI, que viven en el suelo, buscan insectos guiadas por señales químicas como el dióxido de carbono o compuestos liberados por plantas dañadas. Una vez localizado el insecto, el nematodo penetra por aberturas naturales o perfora la cutícula con una estructura especializada. Dentro del cuerpo, evade el sistema inmunológico y libera bacterias simbióticas, que provocan una infección letal en 24 a 48 horas. Las bacterias transforman el interior del insecto en una fuente de alimento para los nematodos y producen antibióticos que evitan la competencia de otros microorganismos. Los nematodos se reproducen dentro del cadáver y, al agotarse los recursos, nuevas JI emergen al suelo para reiniciar el ciclo.

Búsqueda del hospedador y penetración. Las JI localizan a sus hospedadores mediante la detección de señales ambientales como dióxido de carbono, vibraciones del suelo y compuestos químicos emitidos por los insectos. Las especies del género *Steinernema* suelen emplear una estrategia de emboscada, permaneciendo inmóviles cerca de la superficie del suelo a la espera de un hospedador que pase cerca. En cambio, las especies de *Heterorhabditis* adoptan una estrategia de búsqueda activa, desplazándose por el suelo hasta encontrar a su presa. Una vez localizado el hospedador, los nematodos penetran a través de aberturas naturales (boca, espiráculos, ano) o perforan directamente la cutícula del insecto mediante la acción de enzimas hidrolíticas, que son proteínas que convierten moléculas complejas en otras más simples mediante hidrólisis, una reacción que utiliza agua para romper enlaces químicos. En los NEP, estas enzimas ayudan a debilitar y penetrar las capas externas del insecto huésped.

Liberación de bacterias simbióticas. Estas bacterias se multiplican rápidamente y secretan diversos factores de virulencia, como toxinas, proteasas y lipasas, que suprimen la respuesta inmune del hospedador y degradan sus tejidos internos, facilitando la colonización.

Muerte del hospedador. Como consecuencia de la septicemia provocada por las bacterias, el insecto muere en un lapso de 24 a 48 horas. Durante este periodo, los nematodos se alimentan de los tejidos en descomposición, mientras las bacterias

continúan generando un ambiente favorable para el crecimiento y reproducción de los nematodos. El cadáver del hospedador se convierte en una fuente rica en nutrientes que permite la realización de múltiples ciclos reproductivos.

Emergencia y dispersión. Una vez agotados los recursos dentro del hospedador, se desarrollan nuevas JI que emergen del cadáver y se dispersan en el suelo en busca de nuevos insectos. Este ciclo garantiza la propagación y permanencia de las poblaciones de NEP en ecosistemas naturales y agrícolas, contribuyendo al control biológico sostenible de plagas.

Función ecológica de los NEP

Control natural de plagas. Los NEP desempeñan un papel clave en la regulación natural de poblaciones de insectos plaga, como larvas de escarabajos, gorgojos y orugas (Hokkanen y Menzler-Hokkanen, 2018).

Mejora de la salud del suelo. La actividad de los NEP en el ecosistema edáfico favorece el reciclaje de nutrientes y estimula la diversidad microbiana (Thakur *et al.*, 2021). Al contribuir a la descomposición de los hospedadores muertos, enriquecen el suelo con materia orgánica, mejorando su fertilidad y promoviendo el crecimiento vegetal.

Conservación de la biodiversidad. El uso de NEP como control biológico disminuye la dependencia de insecticidas químicos, protegiendo así a polinizadores, fauna silvestre y organismos acuáticos.

Estabilidad ecológica. La incorporación de NEP ayuda a mantener la estabilidad de agroecosistemas y bosques, controlando insectos herbívoros y evitando daños graves a las plantas (Karuppiyah *et al.*, 2025).

Agricultura y silvicultura sostenibles. El uso de NEP en el manejo integrado de plagas (MIP) ofrece una alternativa biológica eficiente a los agroquímicos, reduce el impacto ambiental y proporciona un control duradero de plagas, protegiendo cultivos y bosques y disminuyendo pérdidas económicas (Singh *et al.*, 2022).

Funciones de los NEP en el manejo integrado de plagas

Compatibilidad con otras estrategias del MIP. Los NEP pueden emplearse en conjunto con otros agentes de control biológico, como microorganismos benéficos, hongos entomopatógenos o insectos depredadores, generando un efecto sinérgico que mejora la supresión de plagas. Esta integración fortalece la eficacia del MIP en diversos sistemas agrícolas.

Uso complementario con pesticidas químicos. Algunas especies de NEP han demostrado ser compatibles con aplicaciones reducidas de insecticidas, lo que permite disminuir la cantidad de residuos químicos en los cultivos y minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente (Abd-Elgawad, 2023). Esta estrategia mixta es útil en programas de transición hacia una agricultura más sostenible.

Integración con prácticas culturales y controles mecánicos. Los NEP pueden complementar técnicas como la rotación de cultivos, el uso de cultivos trampa, la incorporación de enmiendas orgánicas y el manejo físico del suelo, formando parte de un enfoque integral que maximiza la efectividad del control de plagas a largo plazo.

Alternativa ecológica y segura. A diferencia de los insecticidas sintéticos, los NEP no representan riesgo para organismos no objetivo, como polinizadores, insectos benéficos, animales silvestres o seres humanos. Además, tras completar su ciclo de vida, se degradan de forma natural en el ambiente, generando un impacto ecológico mínimo. Seguros para las personas, los animales y el ambiente, los NEP son una alternativa ecológica a los pesticidas químicos y una herramienta clave del MIP. Pueden aplicarse mediante riego o pulverización convencional, y destacan por su capacidad para buscar plagas ocultas en el suelo. Sin embargo, su eficacia depende de las condiciones ambientales: requieren humedad, temperaturas moderadas y baja exposición solar. Además, tienen una vida útil corta y su

producción y almacenamiento implican costos adicionales. Los NEP se utilizan con éxito en cultivos de alto valor (frutas, hortalizas y ornamentales) y en el control de plagas del suelo y forestales. Los avances en formulación y tecnología buscan mejorar su estabilidad y ampliar su uso.

Supresión prolongada de plagas. Los NEP tienen la capacidad de establecer poblaciones persistentes en el suelo, ofreciendo un control continuo de insectos plaga. Su capacidad para reciclarse a través de hospedadores sucesivos les permite adaptarse a brotes de plagas, actuando de forma eficiente en el tiempo.

Flexibilidad de aplicación y facilidad de uso. Los NEP pueden aplicarse mediante sistemas de riego, aspersiones foliares o tratamientos al suelo, lo que facilita su incorporación en diversos sistemas de producción agrícola. Son adecuados tanto para cultivos en campo abierto como en invernaderos, huertos y áreas de césped. Además, su eficacia se mantiene bajo distintas condiciones ambientales, especialmente en suelos con buena humedad.

Retos y perspectivas

Pese a su efectividad comprobada, la adopción comercial de los NEP en México aún enfrenta importantes desafíos. Entre ellos destacan la optimización de técnicas de formulación y almacenamiento, para preservar la viabilidad y actividad infectiva

de los nematodos durante su transporte y aplicación. Además, es fundamental fortalecer la capacitación de los productores en el manejo adecuado de estos agentes biológicos.

Investigaciones realizadas en instituciones demuestran que los NEP pueden reducir significativamente las poblaciones de plagas en campo, especialmente cuando se aplican bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura. Estas experiencias exitosas demuestran su potencial como una alternativa ecológica frente al uso excesivo de plaguicidas químicos, contribuyendo así a la protección del ambiente y la salud humana.

La biotecnología moderna abre nuevas rutas para superar estas limitantes: desde la creación de bioformulados más estables, en presentaciones tipo polvo o gel, hasta la identificación y selección de cepas nativas con mayor tolerancia a la desecación y adaptadas a los suelos mexicanos. Estas innovaciones marcan el camino hacia un biocontrol más eficiente, accesible y ambientalmente responsable, consolidando el papel de los NEP como actores clave en la agricultura del futuro.

Referencias

Abd-Elgawad MM (2023). Optimizing entomopathogenic nematode genetics and applications for the integrated management of horticultural pests. *Horticultrae* 9(8):865.

Grunseich JM, Aguirre NM, Thompson MN *et al.* (2021). Chemical Cues from Entomopathogenic Nematodes Vary Across Three Species with Different Foraging Strategies, Triggering Different

Behavioral Responses in Prey and Competitors. *J Chem Ecol* 47(10-11):822-833. DOI: [10.1007/s10886-021-01304-8](https://doi.org/10.1007/s10886-021-01304-8).

Hokkanen HM and Menzler-Hokkanen I (2018). Insect pest suppressive soils: buffering pulse cropping systems against outbreaks of Sitona weevils. *Ann Entomol Soc Am* 111(4):139-143.

Karuppiiah P, Thayalan KJ, Thangam GS *et al.* (2025). Bio-Control Agents: A Sustainable Approach for Enhancing Soil Nutrients Use Efficiency in Farming. In *Bio-control Agents for Sustainable Agriculture: Diversity, Mechanisms and Applications* (pp. 209-260). Singapore: Springer Nature Singapore.

Pacheco HM, Reséndiz Martínez J and Arriola Padilla VJ. (2019). Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(56):4-32.

Singh AK, Kumar M, Ahuja A *et al.* (2022). Entomopathogenic nematodes: a sustainable option for insect pest management. In *Biopesticides* (pp. 73-92). Woodhead Publishing, Sawston, UK.

Thakur N, Tomar P, Kaur S *et al.* (2021). Entomopathogenic soil microbes for sustainable crop protection. In *Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture: Functional Annotation* (pp. 529-571). Cham: Springer International Publishing, Switzerland.