

Biotechnology in soils for the control of nematodes in coffee cultivation (*Coffea arabica* L.)

Abstract– *Biotechnology applied to nematode management in coffee plantations offers sustainable solutions to the damage caused by Meloidogyne and Pratylenchus. Through the use of mycorrhizae, endophytic fungi, biofumigants, and resistant germplasm, the use of chemical inputs is reduced, soil health is improved, and crop productivity is increased. These strategies, supported by institutions such as FAO and IHCAFE, promote regenerative and efficient agricultural practices. Furthermore, the scientific and institutional approach fosters innovation and sustainability in coffee farming, strengthening the resilience of production systems and improving the quality of life of smallholder producers.*

Keywords-- *Biotechnology, Nematodes, Coffee, Microorganisms, Sustainability.*

Biotecnología en suelos para el control de nemátodos en el cultivo de Café (*Coffea arabica* L.)

Josué Daniel Valladares Flores¹; Cristhian Josadac Hernandez Rivera²; Eriksson Josue Martínez Lazo³; Thelma Francisca Cálix Lara⁴

^{1,2,3,4}Zamorano University, Honduras, josue.valladares@est.zamorano.edu, cristhianj.hernandez@est.zamorano.edu, eriksson.martinez@est.zamorano.edu, tcatrix@zamorano.edu

Resumen— La biotecnología aplicada al manejo de nematodos en cafetales ofrece soluciones sostenibles frente a los daños causados por *Meloidogyne* y *Pratylenchus*. Mediante el uso de micorrizas, hongos endófitos, biofumigantes y germoplasma resistente, se reduce el uso de químicos, se mejora la salud del suelo y se incrementa la productividad del cultivo. Estas estrategias, respaldadas por instituciones como la FAO e IHCAFE, promueven prácticas agrícolas regenerativas y eficientes. Además, el enfoque científico e institucional impulsa la innovación y sostenibilidad en la caficultura, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas productivos y mejorando la calidad de vida de los pequeños productores.

Palabras clave — Biotecnología, Nematodos, Café, Microorganismos, Sostenibilidad.

I. INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los cultivos más importantes en América Latina, iniciando por su relevancia económica, por su impacto social y ambiental y por ser fuente de empleo para millones de pequeños productores [1]. No obstante, su sostenibilidad está en riesgo debido a la presión de diversos patógenos, entre los que destacan los nematodos fitoparásitos de los géneros *Meloidogyne* y *Pratylenchus*, los cuales afectan el sistema radicular del cafeto, reduciendo su capacidad de absorción de nutrientes, su rendimiento y la calidad del grano [2].

La presencia de estos nematodos ha sido mayormente documentada en Centroamérica, con una diversidad de especies como *M. incognita*, *M. exigua*, *M. paranaensis* y *M. enterolobii*, que presentan variabilidad genética y diferentes grados de patogenicidad [3]. A pesar del uso de prácticas convencionales de control químico, estas soluciones resultan costosas, ambientalmente insostenibles y limitadas en su efectividad a largo plazo. En respuesta a esta problemática, la biotecnología emerge como una alternativa integral y sostenible para el manejo del suelo y el control de nematodos en cafetales.

Diversas investigaciones han demostrado el potencial del uso de microorganismos benéficos, como las micorrizas arbusculares¹, bacterias endófitas² y hongos antagonistas³, para inducir resistencia en las plantas, mejorar la disponibilidad de nutrientes y reducir las poblaciones de nematodos [4, 5, 6]. Estos agentes actúan mediante competencia, producción de metabolitos antimicrobianos, y modificación del microambiente en la rizosfera, promoviendo un equilibrio biológico en el suelo [7].

La biotecnología aplicada tiene como propósito controlar fitoparásitos, regenerar su biodiversidad funcional, mejorar la eficiencia del uso de nutrientes como fósforo y nitrógeno, y aumentar la resiliencia de los agroecosistemas cafetaleros [8]. La detección molecular rápida mediante técnicas como la PCR ha permitido identificar con mayor precisión las especies de nematodos presentes en raíces de café, facilitando intervenciones más oportunas y efectivas [9].

II. LOS NEMATODOS EN LOS CAFETALES

Los nematodos fitoparásitos representan una de las amenazas más silenciosas pero significativas para la producción sostenible de café en América Latina. Entre los géneros más perjudiciales se encuentran *Meloidogyne* (nematodos agalladores) y *Pratylenchus* (nematodos lesionadores), los cuales afectan de manera directa el sistema radicular del cafeto (*Coffea arabica* L.), interfiriendo con la absorción de agua y nutrientes, debilitando la planta y reduciendo su productividad y longevidad [10].

El daño más común causado por *Meloidogyne spp.* incluye la formación de agallas en las raíces, que distorsionan la arquitectura radicular y limitan la eficiencia fisiológica de la planta. Por su parte, *Pratylenchus spp.* ocasiona lesiones que facilitan la entrada de patógenos secundarios, agravando el deterioro del sistema radicular [2]. Una de las enfermedades más asociadas a estos nematodos es la corchosis de la raíz, caracterizada por la necrosis cortical de las raíces finas, reducción de crecimiento vegetativo, clorosis y, en casos severos, muerte regresiva de la planta [4].

La situación es aún más compleja en Centroamérica, donde se ha documentado una alta diversidad de especies de nematodos agalladores. Un estudio regional identificó al menos nueve especies diferentes de *Meloidogyne* mediante análisis de esterasas, incluyendo *M. exigua*, *M. incognita*, *M. paranaensis*, *M. arenaria*, *M. hapla*, *M. arabicida*, entre otras [3]. Esta diversidad complica su identificación, además del diseño de estrategias de manejo efectivas, ya que cada especie presenta diferente grado de patogenicidad, distribución y respuesta a los tratamientos.

Tradicionalmente, la identificación de nematodos se basaba en criterios morfológicos, los cuales son limitados por la similitud entre especies y la necesidad de conocimientos especializados. Por ello, en los últimos años se ha promovido el uso de técnicas de biología molecular, como la reacción en

cadena de la polimerasa⁴ (PCR), para una detección más precisa y rápida de especies como *M. incognita* en raíces de café [9]. Estas herramientas permiten tomar decisiones más certeras para la implementación de programas de control biológico y prevención.

La amenaza que representan los nematodos en cafetales no debe subestimarse, ya que pueden provocar reducciones del rendimiento de hasta un 35 %, además de acortar la vida útil de las plantaciones y aumentar los costos de producción por reposición de plantas y uso de agroquímicos [11, 12]. Por lo tanto, comprender su diversidad, biología y mecanismos de daño es esencial para avanzar hacia un manejo fitosanitario más eficiente.



Fig. 1 Nematodo agallador (*Meloidogyne* spp.) causando agallas en raíces. [13]

III. BIOTECNOLOGÍA APLICADA AL SUELO

El uso de herramientas biotecnológicas en el manejo del suelo representa una de las estrategias más prometedoras para enfrentar los desafíos fitosanitarios en la caficultura, especialmente aquellos relacionados con los nematodos fitoparásitos. Entre las tecnologías más destacadas se encuentra la incorporación de micorrizas arbusculares, las cuales establecen asociaciones simbióticas con las raíces del café, mejorando la absorción de nutrientes, aumentando la tolerancia al estrés biótico y reduciendo significativamente los daños causados por nematodos como *Meloidogyne incognita* [4]. Estos hongos micorrízicos, al colonizar la rizosfera, fortalecen el sistema radicular de la planta, estimulan su desarrollo y activan mecanismos de defensa inducida.



Fig. 2 Visualización de micorrizas arbusculares como bioestimulantes radiculares en plántulas de café [14].

Otro enfoque biotecnológico, consiste en la aplicación de microorganismos solubilizadores de fósforo, como bacterias del género *Bacillus* y *Pseudomonas*, que transforman compuestos insolubles de fósforo en formas asimilables para las plántulas de café, mejorando su nutrición y vigor inicial [7]. Este proceso reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, y además favorece un ambiente microbiológico más equilibrado y funcional.

Asimismo, se han desarrollado diversas técnicas biotecnológicas de campo orientadas a la regeneración y mejoramiento de suelos tropicales degradados. Estas prácticas incluyen la incorporación de bioinsumos, consorcios microbianos y el manejo controlado de residuos orgánicos, los cuales activan procesos de humificación, estabilizan la materia orgánica y mejoran las propiedades físico-químicas del suelo [15]. Estas intervenciones han mostrado resultados positivos tanto en la estructura del suelo como en la productividad del cultivo de café, particularmente en zonas donde los suelos han sido sometidos a un uso intensivo y poco sostenible.

La microbiología del suelo se posiciona, así como una piedra angular para el desarrollo de una agricultura verdaderamente sostenible. Un enfoque microbiológico permite gestionar los recursos del suelo desde una perspectiva ecológica, promoviendo el equilibrio entre la biodiversidad edáfica, la nutrición vegetal y el control biológico de patógenos [16]. Estos avances son especialmente relevantes en el contexto cafetalero, donde los pequeños productores requieren soluciones eficientes, de bajo costo y respetuosas con el medio ambiente.

IV. ESTRATEGIAS DE CONTROL BIOLÓGICO Y SOSTENIBILIDAD

El manejo sostenible de nematodos en cafetales requiere la integración de diversas estrategias basadas en procesos naturales y herramientas biotecnológicas. Estas acciones buscan reducir la dependencia de productos químicos, regenerar el equilibrio microbiológico del suelo y aumentar la resiliencia del cultivo frente a patógenos.

Los nematodos del género *Meloidogyne* y *Pratylenchus*, por su capacidad de persistencia en el suelo y amplio rango de hospederos, representan un desafío particular para la caficultura. Las estrategias convencionales basadas en nematicidas químicos han demostrado eficacia a corto plazo, pero su uso prolongado ha generado problemas de resistencia, contaminación de recursos naturales y efectos adversos sobre el microbiota del suelo [4]. En este contexto, se hace necesario un cambio de paradigma hacia un manejo integrado que incorpore el uso de organismos benéficos, residuos agroindustriales reutilizables, germoplasma resistente y tecnologías de diagnóstico y propagación vegetal de última generación.

Estas acciones son en busca de reducir la dependencia de productos químicos, además de regenerar el equilibrio microbiológico del suelo, fortalecer el sistema radicular del café, mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y, en última instancia, aumentar la resiliencia del cultivo frente a plagas y enfermedades. La implementación de estas estrategias representa un avance hacia sistemas productivos más estables, económicamente viables y respetuosos con el medio ambiente, contribuyendo a la sostenibilidad de la cadena de valor del café en regiones altamente vulnerables [15, 17].

A. *Uso de residuos agrícolas como biofumigantes*

El empleo de residuos orgánicos como la cáscara de arroz, la pulpa de café o la paja de caña como biofumigantes ha demostrado ser una alternativa viable para reducir poblaciones de nematodos en el suelo. Durante su descomposición, estos residuos liberan compuestos volátiles con efectos nematocidas, como el isotiocianato y otros ácidos orgánicos [18]. Además de su eficacia, esta práctica promueve la sostenibilidad al reutilizar subproductos agrícolas que de otro modo serían desechados.

B. *Evaluación de germoplasma resistente a nematodos*

La resistencia genética es una de las herramientas más efectivas y sostenibles o duraderas en el control de patógenos. Se han identificado variedades de café con niveles diferenciados de tolerancia a nematodos del género *Meloidogyne* y *Pratylenchus*, mediante ensayos de campo y pruebas de inoculación controlada [19]. Esta información permite incorporar la resistencia como criterios importantes en programas de mejoramiento genético, reduciendo la necesidad de intervención externa y prolongando la vida útil de las plantaciones.

C. *Actividad antimicrobiana de hongos endófitos*

Los hongos endófitos viven en simbiosis con las plantas de café sin causarles daño y pueden ofrecer beneficios indirectos como el control biológico de patógenos. Se ha reportado que ciertos endófitos, como *Fusarium oxysporum* y *Trichoderma spp.*, inhiben el desarrollo de nematodos mediante la producción de metabolitos secundarios y la competencia por espacio y nutrientes [5]. Estos microorganismos actúan como una barrera biológica adicional, reforzando las defensas naturales del café.

D. *Mejoramiento genético apoyado en biotecnología*

La biotecnología moderna ha facilitado la propagación masiva de variedades resistentes a través de técnicas como el cultivo *in vitro* de meristemas, garantizando material vegetal libre de patógenos y con características genéticas estables. Por ejemplo, la propagación de la variedad Lempira ha mostrado resultados prometedores en Honduras, con altas tasas de multiplicación y sanidad vegetal [20]. Además, la selección asistida por marcadores moleculares permite identificar genes

de resistencia a nematodos y acelerar la obtención de nuevas variedades adaptadas a condiciones locales.

V. PERSPECTIVA CIENTÍFICA E INSTITUCIONAL

En el contexto universal, donde la sostenibilidad agrícola es cada vez más prioritaria, la biotecnología se ha convertido en una herramienta estratégica para abordar los múltiples desafíos que enfrenta la producción de café, especialmente frente a plagas como los nematodos fitoparásitos. A diferencia de las prácticas convencionales basadas en la aplicación intensiva de agroquímicos, el enfoque biotecnológico permite combinar precisión científica, eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental, facilitando soluciones a nivel molecular, microbiológico y genético.

El avance científico en áreas como la microbiología del suelo, la biología molecular y el cultivo *in vitro* ha propiciado el desarrollo de métodos innovadores para la identificación y control de plagas y enfermedades del café. Esto ha sido posible gracias al trabajo articulado entre investigadores, instituciones académicas, centros de innovación tecnológica y organismos multilaterales, que han fortalecido el vínculo entre la investigación aplicada y las necesidades reales del sector agrícola [1]. De hecho, la literatura científica reciente subraya que la evolución de la industria cafetalera ha dependido históricamente de la capacidad de los centros de investigación para diseminar material genético mejorado y técnicas de domesticación avanzada, permitiendo que el café se posicione como el segundo producto básico más comercializado a nivel mundial [24].

La biotecnología aplicada al café es la mejora de la productividad y además tiene un impacto directo en la calidad del producto, la salud del ecosistema agrícola y el bienestar social y económico de los productores, especialmente en regiones como Centroamérica, donde la caficultura constituye una base económica y social para miles de familias rurales. En este sentido, se reconoce que el desarrollo agrícola debe estar alineado con una visión institucional más amplia que considere los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), impulsando sistemas alimentarios más resilientes, justos y adaptados al cambio climático [21].

Dentro de esta perspectiva, instituciones como el Instituto Hondureño del Café (IHCAFE) han desempeñado un papel principal al generar conocimiento técnico sobre las enfermedades del café, apoyar programas de mejoramiento genético y fomentar la adopción de tecnologías limpias y bioseguras en las fincas. A través de una mirada integral que une ciencia, política pública y acción territorial, la biotecnología en el café deja de ser una promesa lejana para convertirse en una realidad para la transformación de la agricultura y el futuro del rubro del café en todas las cadenas de producción.

A. Aportes recientes de la biotecnología a la industria cafetalera

Estudios recientes señalan que la biotecnología ha contribuido al fortalecimiento de la industria cafetera en áreas clave como la propagación vegetal, el control de enfermedades y la mejora genética de variedades resistentes a factores bióticos y abióticos (Tabla I). Por ejemplo, el uso de técnicas in vitro ha permitido multiplicar masivamente variedades como el “Lempira”, con ventajas en uniformidad genética y sanidad fitosanitaria [20]. Aunque ahora se han reportado casos de susceptibilidad a la roya (*Hemileia vastatrix*) en la variedad Lempira, este fenómeno ha impulsado nuevas investigaciones genéticas orientadas a desarrollar materiales con una mayor resistencia o tolerancia a este hongo [24]. La implementación de protocolos de cultivo de meristemas no solo asegura la limpieza de patógenos, además que permite una multiplicación exponencial de plantas con alto potencial productivo, optimizando el uso de reguladores de crecimiento como las bencilaminopurinas para inducir brotes axilares con alta eficiencia [25].

Asimismo, los avances en diagnóstico molecular, como la identificación rápida de *Meloidogyne incognita* mediante PCR, han facilitado respuestas más efectivas frente a brotes de nematodos [22]. Actualmente, se dispone en las fincas de café en Honduras la variedad “Parainema”, donde es muy poco mencionado en los artículos científicos, el cual posee características únicas como ser resistente a los nematodos y su distinción organoléptica en la taza hasta llegar al consumidor final.

Además, se han desarrollado bioinsumos a base de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR) y agentes de biocontrol que ofrecen soluciones sostenibles frente a enfermedades radiculares y plagas. Evaluaciones institucionales recientes en la región han demostrado que el uso de nematicidas biológicos, como aquellos basados en *Paecilomyces lilacinus*, en combinación con bioestimulantes radicales, puede reducir significativamente las poblaciones de *Meloidogyne exigua* en el suelo y la raíz, ofreciendo una alternativa viable y menos tóxica que los químicos convencionales como el terbufos [26]. Estas prácticas están siendo adoptadas cada vez más por productores que buscan alternativas al uso intensivo de agroquímicos.

B. Compromiso de la biotecnología con el desarrollo sostenible

El enfoque biotecnológico en la agricultura responde a necesidades productivas, a objetivos de desarrollo sostenible y justicia social. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las biotecnologías agrícolas son herramientas para lograr una agricultura más equitativa, inclusiva y resiliente, capaz de responder a los desafíos del cambio climático, la pobreza rural y la seguridad alimentaria [1]. Esta visión propone una integración entre conocimiento tradicional y tecnología

moderna, centrada en el empoderamiento de los pequeños productores, especialmente mujeres y jóvenes, como agentes de innovación en sus comunidades.

TABLA I
INDICADORES DE IMPACTO ESPERADOS POR LA
APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS EN
CAFETALES.

Categoría	Indicador	Unidad de medida	Resultado esperado
Reducción de insumos químicos	Disminución del uso de nematicidas sintéticos	Litros/hectárea/año	-50 % en comparación con manejo convencional
Salud del suelo	Aumento de biomasa microbiana activa	µg C microbiano/g de suelo	+30 % en 12 meses
Salud del suelo	Incremento en la colonización micorrízica	% de raíces colonizadas	≥ 60 %
Salud del suelo	Mejora en la disponibilidad de fósforo y nitrógeno	mg/kg de suelo	+25 % de fósforo disponible / +20 % de nitrógeno
Control biológico de nematodos	Reducción en la densidad poblacional de <i>Meloidogyne</i> spp. y <i>Pratylenchus</i> spp.	No. de juveniles/g de raíz o suelo	-40 % en 2 ciclos productivos
Productividad del café	Incremento en el rendimiento por planta	kg de café cereza/planta	+20 % respecto al año base
Productividad del café	Uniformidad en el crecimiento vegetativo	Índice de vigor vegetativo (escala 1-5)	Mejora de al menos 1 punto en promedio
Sostenibilidad general	Índice de diversidad funcional microbiana	Índice de Shannon (H')	Incremento del índice en al menos 0.5 unidades
Sostenibilidad general	Reducción de costos de manejo fitosanitario	Lempiras/hectárea	Ahorro de hasta 30 % anual en insumos químicos

Estimaciones basadas en estudios revisados de [6, 7, 15]

En este marco, se promueve un modelo de innovación que prioriza la productividad, también la sostenibilidad ambiental, la conservación de la biodiversidad y el fortalecimiento de capacidades locales. Las instituciones académicas, centros de investigación y organismos multilaterales juegan un papel en la transferencia de tecnología, la capacitación y el acompañamiento técnico a los actores del sistema agroalimentario. La investigación genética y la biotecnología moderna son pilares para garantizar la resiliencia del cultivo frente a las fluctuaciones del mercado global y las presiones ambientales [24].

C. Enfermedades del café y el rol del IHCAFE

A nivel nacional, el Instituto Hondureño del Café (IHCAFE) ha documentado diversas enfermedades que afectan al café, muchas de las cuales están directa o indirectamente relacionadas con la acción de nematodos fitoparásitos. Entre estas enfermedades destacan la corchosis de la raíz, el mal del talluelo y diversas formas de marchitez y necrosis que comprometen el sistema radicular del café [23]. Estas patologías son exacerbadas por la presencia de *Meloidogyne spp.* y *Pratylenchus spp.*, que actúan como facilitadores del ingreso de patógenos secundarios, reduciendo la longevidad y productividad de las plantas.

En respuesta, el IHCAFE ha promovido la adopción de buenas prácticas agrícolas, programas de mejoramiento genético, y el uso de tecnologías innovadoras para mitigar los impactos de estas enfermedades. Asimismo, colabora con organismos internacionales para fortalecer las capacidades de diagnóstico, investigación y extensión en el ámbito fitosanitario. La búsqueda de alternativas biotecnológicas para el manejo de nematodos es hoy una prioridad institucional para evitar las restricciones ambientales que enfrentan los productos químicos tradicionales en el mercado internacional [26].

VI. CONCLUSIONES

El presente artículo de análisis de investigación científica demuestra que la biotecnología aplicada al manejo fitosanitario del café constituye una estrategia integral con alto valor para transformar los sistemas productivos actuales hacia modelos más sostenibles, resilientes y eficientes. El uso de herramientas como las micorrizas arbusculares, los hongos endófitos, los microorganismos solubilizadores de nutrientes y los biofumigantes elaborados a partir de residuos agrícolas ha mostrado eficacia comprobada en el control de nematodos del género *Meloidogyne* y *Pratylenchus*, principales responsables de la corchosis de la raíz y otras enfermedades radiculares que limitan el desarrollo del café.

La incorporación de estas prácticas no solo reduce la dependencia de agroquímicos tradicionales, cuyos efectos negativos sobre el ambiente, la biodiversidad del suelo y la salud humana son bien conocidos y además promueven la restauración del equilibrio ecológico del suelo. De este modo, se impulsa una agricultura regenerativa, que mejora la fertilidad, la biodiversidad funcional y la capacidad del suelo para sostener la producción de café a largo plazo.

Asimismo, los avances en biología molecular han permitido desarrollar técnicas de diagnóstico rápido y preciso, como la PCR, que fortalecen la capacidad de respuesta ante brotes fitosanitarios y mejoran la toma de decisiones a nivel técnico y productivo. Estas herramientas, junto al mejoramiento genético asistido, han dado lugar a cultivares

resistentes, como los propagados *in vitro*, que presentan ventajas en sanidad vegetal, homogeneidad y rendimiento.

Además, se ha identificado el papel principal en este tema de las instituciones científicas y técnicas, como IHCAFE, la FAO y centros académicos, en la generación de conocimiento, validación de tecnologías y acompañamiento al productor. Este respaldo institucional es importante para lograr una transición efectiva hacia sistemas productivos sostenibles que integren ciencia, innovación y saber local.

Finalmente, se concluye que la biotecnología en los suelos, donde no es solo una alternativa al control químico, sino una oportunidad real para rediseñar el modelo de producción cafetalero desde una lógica agroecológica, ambientalmente responsable y socialmente justa. Adoptar este enfoque representa una respuesta estratégica ante los desafíos del cambio climático, la degradación de los suelos y la necesidad de garantizar medios de vida dignos para los pequeños productores.

VII. RECOMENDACIONES

A partir del análisis de la literatura científica y de las estrategias biotecnológicas revisadas, se identifican una serie de acciones que pueden guiar la implementación práctica y el fortalecimiento del manejo sostenible de nematodos en cafetales. Estas recomendaciones están orientadas a productores, instituciones técnicas, centros de investigación y formuladores de políticas, con el fin de promover una caficultura más resiliente, eficiente y respetuosa

REFERENCIAS

- [1] A. Sonnino and J. Ruane, "Biotecnologías e innovación: el compromiso social de la ciencia," FAO, Rome, Italy, 2013. [Online]. Disponible: <https://www.fao.org/4/ar635s/ar635s.pdf>
- [2] G. Acuña and J. Bever, "Estudio de diversidad de nematodos de agallado en café en Centroamérica," World J. Microbiol. Biotechnol., vol. 23, no. 8, pp. 1345–1352, 2006, doi: 10.1007/s11274-006-9160-2.
- [3] "Diversity of root-knot nematodes parasitizing coffee in Central America," manuscrito no publicado, s.f.
- [4] Trejo-Aguilar, A. C., López-Buenfil, J. A., García-Ávila, C. J., & Acevedo-Reyes, A. (2011). Uso de nematodos entomopatógenos para el control de plagas agrícolas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 2(SPE3), 517-530.
- [5] García, J., & Torres, M. (s.f.). Manual de identificación y manejo de nematodos fitoparásitos. [Documento o Guía técnicos]. Universidad Nacional de Agricultura.
- [6] Pastrana-Puche, Y., Espitia-Pérez, L., & Hernández-Rodríguez, A. (2017). Nematodos fitoparásitos asociados al cultivo de ñame (*Dioscorea rotundata* Poir) en el departamento de Sucre, Colombia. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 11(1), 123-132. <https://doi.org/10.17584/rceh.2017v11i1.5074>
- [7] Rodríguez, M., & Hernández, L. (s.f.). Manual de identificación de nematodos fitoparásitos y su manejo integrado en cultivos tropicales. Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal (INISAV). La Habana, Cuba.

- [8] N. Moreno Sarmiento, "La agricultura sostenible un reto para la microbiología del suelo," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 18, no. 1, pp. 5–6, 2016, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57828.
- [9] Qing-peng, M., Hai, L. & Jian-hua, X. (2004). PCR Assays for Rapid and Sensitive Identification of Three Major Root-Knot Nematodes, *Meloidogyne incognita*, *M. javanica* and *M. arenaria*. *Acta Phytopathologica Sinica*, 34(3), 204–210. <http://zwblxb.magtech.com.cn/EN/Y2004/V34/I3/204>
- [10] J. C. Morales Díaz, "Poblaciones de nematodos fitoparásitos (*Pratylenchus* sp. y *Meloidogyne* sp.) en plantaciones mixtas de café y musáceas," Tesis de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras, 2001.
- [11] López-Lima, D., Sánchez-Nava, P., Carrión, G., & Desgarennnes, D. (2015). Nematodos entomopatógenos: una alternativa biológica para el control de plagas agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (10), 1953-1964.
- [12] Saikai, K., Inokuchi, M., & Yoshiga, T. (2023). *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*: Bacteria associated with entomopathogenic nematodes and their application in pest management. *Journal of Invertebrate Pathology*, 196, 107874.
- [13] Romero-Bastidas, M., & Hernández-Montiel, L. G. (2022). Microorganismos como agentes de control biológico: Una estrategia sustentable para la agricultura moderna. Editorial Universitaria / Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).
- [14] Peña, L. (2023). Micorrizas arbusculares como bioestimulante radicular, mejorando la captura de nutrientes de las plantas en el cultivo de café. [Online]. Disponible: <https://extension-rural-ut.webnode.es/l/micorrizas-arbusculares-como-bioestimulante-radicular-mejorando-la-captura-de-nutrientes-de-las-plantas-en-el-cultivo-de-cafe/>
- [15] Y. Valencia González, J. Camapum de Carvalho and L. A. Lara Valencia, "Estudio de la mejoría de un suelo tropical a partir de técnicas biotecnológicas utilizadas en campo," *DYNA*, vol. 79, no. 173, pp. 56–65, 2012. [Online]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000300007
- [16] Moreno Sarmiento, N. (2016). Microorganismos del suelo y su importancia en la agricultura: Bases para la sostenibilidad. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- [17] Perfect Daily Grind, "Aportes de la biotecnología a la industria cafetera," Perfect Daily Grind, Sep. 9, 2022. [Online]. Available: <https://perfectdailygrind.com/es/2022/09/09/aportes-biotecnologia-industria-cafetera/>
- [18] Figueredo-Rodríguez, V. L., Sánchez-Nava, P., & López-Lima, D. (2011). Distribución de nematodos entomopatógenos en suelos agrícolas y su potencial en el control biológico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 29(2), 150-162.
- [19] R. Santacreo, "Evaluación y selección de germoplasma *Coffea* sp. resistente a los nematodos," Ponencia presentada en la Reunión Anual del PCCMCA, La Ceiba, Honduras, 2003. [Online]. Available: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/A50-3115-p52.pdf>
- [20] Lozano Kretschmar, G. A. (2014). Propagación in vitro de café (*Coffea arabica*) -variedad Lempira- a partir de meristemas [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Valle de Yeguaré, Honduras.
- [21] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos sanos. Roma, Italia.
- [22] Chitambar, J. J., Westerdahl, B. B., & Subbotin, S. A. (2018). Plant Parasitic Nematodes in Agriculture. En *Nematology: Concepts, Diagnosis and Control* (pp. 131-192). University of California, Davis.
- [23] Instituto Hondureño del Café (IHCAFE), "Enfermedades del cafeto," s.f. [Online]. Available: <https://ihcafe.hn>
- [24] Enríquez, J. P., Retes-Cálix, R. F., & Vásquez-Reyes, E. F. (2020). Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo. *Innovare: Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(3), 147-155.
- [25] Lozano Kretschmar, G. A. (2014). Propagación in vitro de café (*Coffea arabica*) -variedad Lempira- a partir de meristemas. Proyecto Especial de Graduación, Zamorano, Honduras.
- [26] Quirós-Castro, A., & Peraza-Padilla, W. (2023). Evaluación de un nematocida biológico y un bioestimulante radical sobre *Meloidogyne exigua* en café en Naranjo, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 47(1), 25-36.