

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i4.1871>

Fitorremediación de suelos destinados a la producción del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) infestados con nematodos (*Meloidogyne* spp.)

*Phytoremediation of soils intended for the production of sugarcane (*Saccharum officinarum*) infested with nematodes (*Meloidogyne* spp.)*

Jean Carlos Quiñonez Campo

jquinonezcampo@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-2445-9389>

Investigador Independiente

Josselyn Camila Nazareno García

josselynnazareno29@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-7283-9985>

Investigador Independiente

Jaidan Marlon Caicedo Ayovi

jaidinho@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-2983-532X>

Investigador Independiente

José Florencio Caicedo Corozo

fcorozo013@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-6654-8430>

Investigador Independiente

Artículo recibido: 10 noviembre 2025 -Aceptado para publicación: 18 diciembre 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La presencia de altas poblaciones de nematodos del género *Meloidogyne* en los suelos, limitan considerablemente la producción agrícola. Razón por la cual, esta investigación tuvo por objeto evaluar la fitorremediación de suelos destinados al cultivo de caña de azúcar infestados por nematodos del género *Meloidogyne* mediante la implementación micorrizas vesículo-arbusculares (MVA) del género *Glomus* spp. Se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial A x B, siendo el Factor A: Variedades de caña de azúcar y el Factor B: Especies de MVA, más un testigo no tratado en cada variedad, para un total de 8 interacciones (tratamientos) con cuatro réplicas. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y para la comparación de promedios entre tratamientos se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey al 5%. Las variables evaluadas fueron de crecimiento y desarrollo vegetativo, el grado de micorrización y la capacidad infectiva de las MVA a los 90 y 180 días. La inoculación con micorrizas arbusculares del género *Glomus* incrementó significativamente los parámetros de crecimiento de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) a los 180 días, con aumentos promedio del 25–40 % respecto a los testigos, destacándose *Rhizophagus intrarradices* por su

mayor efecto. El grado de micorrización alcanzó valores entre 86–93 % y una capacidad infectiva de hasta 1,91, superiores a *G. fasciculatum* y *G. mosseae*. Paralelamente, las poblaciones de nematodos del género *Meloidogyne* se redujeron de un grado 5 inicial a grado 2 en la escala de Zeck, confirmando la elevada capacidad fitorremediadora de la asociación caña–micorriza. Finalmente, se concluye que los tratamientos con MVA presentaron un efecto positivo tanto en el crecimiento y desarrollo vegetativo del cultivo, en comparación con ambos testigos, como en la capacidad fitorremediadora del suelo infestado, obteniéndose los mejores resultados.

Palabras clave: Desarrollo vegetativo, *Glomus* spp, micorrizas, MVA, *S. officinarum*

ABSTRACT

The presence of high populations of nematodes of the genus *Meloidogyne* in soils considerably limits agricultural production. Therefore, the objective of this study was to evaluate the phytoremediation of soils intended for sugarcane cultivation infested with *Meloidogyne* nematodes through the application of vesicular–arbuscular mycorrhizae (VAM) of the genus *Glomus* spp. A completely randomized design (CRD) with a factorial arrangement A × B was used, where Factor A corresponded to sugarcane varieties and Factor B to VAM species, plus an untreated control for each variety, resulting in a total of eight interactions (treatments) with four replicates. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons were performed using Tukey's multiple range test at 5%. The evaluated variables included vegetative growth and development, degree of mycorrhization, and infective capacity of VAM at 90 and 180 days. Inoculation with arbuscular mycorrhizae of the genus *Glomus* significantly increased sugarcane growth parameters (*Saccharum officinarum* L.) at 180 days, with average increases of 25–40% compared to the controls, with *Rhizophagus intrarradices* showing the greatest effect. The degree of mycorrhization reached values between 86–93%, with an infective capacity of up to 1.91, exceeding those of *G. fasciculatum* and *G. mosseae*. Simultaneously, populations of *Meloidogyne* nematodes were reduced from an initial grade 5 to grade 2 on the Zeck scale, confirming the high phytoremediation capacity of the sugarcane–mycorrhiza association. Finally, it is concluded that VAM treatments exerted a positive effect on both vegetative growth and development of the crop, compared to both controls, as well as on the phytoremediation capacity of the infested soil, yielding the best results.

Keywords: Fertilization, dosage, agronomic characteristics, productive parameters

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Atribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

Los nematodos fitoparásitos, en particular los nematodos agalladores del género *Meloidogyne* spp., se encuentran entre las plagas edáficas de mayor impacto económico a nivel mundial, causando reducciones significativas en el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos en diversos agroecosistemas, al afectar directamente la funcionalidad del sistema radical y la absorción de nutrientes [1], [2], [3].

En el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), la infestación por nematodos provoca alteraciones severas en las raíces, lo que se traduce en un crecimiento reducido, menor absorción de agua y nutrientes, y pérdidas de rendimiento que pueden oscilar entre el 11 y el 25 % en campos con altas poblaciones infestantes [4]. Adicionalmente, los nematodos endoparásitos sedentarios como *Meloidogyne* spp. presentan una amplia distribución geográfica y una elevada persistencia en el suelo, atribuida a su alta adaptabilidad a condiciones ambientales adversas y a su estrategia reproductiva, lo que dificulta su manejo mediante métodos convencionales [5].

Tradicionalmente, el control de *Meloidogyne* spp. ha dependido del uso de nematicidas químicos sintéticos; sin embargo, estos productos representan serios riesgos para la salud humana y el ambiente, además de presentar una eficacia limitada debido a la rápida recuperación de las poblaciones y a las restricciones regulatorias impuestas sobre fumigantes altamente tóxicos [6].

En respuesta a estas limitaciones, las estrategias actuales de manejo sostenible se orientan hacia alternativas biológicas, incluyendo el uso de microorganismos benéficos del suelo capaces de suprimir poblaciones de nematodos y fortalecer la tolerancia de las plantas al estrés biótico [7]. Entre estas alternativas, las micorrizas arbusculares (MA) destacan por su capacidad de establecer asociaciones simbióticas con las raíces, mejorando la nutrición mineral y el vigor vegetal, al tiempo que reducen los niveles de infección por nematodos y mitigan sus efectos perjudiciales [5], [8], [9].

La caña de azúcar constituye un cultivo de elevada importancia económica y social en Ecuador [10], al proveer productos estratégicos como azúcar, bioetanol y subproductos energéticos, además de generar empleo y sustentar economías rurales [11]. Su integración en sistemas de agricultura familiar sostenible refuerza la necesidad de desarrollar soluciones resilientes y de bajo uso de insumos externos frente a plagas edáficas persistentes [12].

En este contexto, la tolerancia intrínseca de la caña de azúcar a *Meloidogyne* spp., combinada con el potencial de la fitorremediación potenciada mediante la simbiosis micorrízica, representa una alternativa agrobiotecnológica prometedora para reducir las poblaciones de nematodos en suelos infestados y mejorar el desempeño productivo del cultivo, sin recurrir al uso de compuestos químicos de alta peligrosidad [13].

En virtud a lo anterior esta investigación tuvo por objetivo evaluar la fitorremediación de suelos destinados al cultivo de caña de azúcar infestados por nematodos del género *Meloidogyne* mediante la implementación micorrizas vesículo-arbusculares (MVA) del género *Glomus* spp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y condiciones agroclimáticas del sitio experimental

La investigación se desarrolló en el polígono de pruebas junto al Laboratorio de Sanidad Vegetal, asentado en el área del vivero de la Estación Experimental Mutile, pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas - Ecuador, en las coordenadas geográficas 0°58'23.1” latitud norte 79°39'59.0” longitud oeste.

Diseño experimental

Se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial A x B, siendo el Factor A: Variedades de caña de azúcar y el Factor B: Especies de MVA, más un testigo no tratado en cada variedad, para un total de 8 interacciones (tratamientos) con cuatro réplicas (Tabla 1).

Tabla 1

Descripción de los tratamientos

Variantes	Descripción
Factor A: Variedades = (2)	
A₁: EC-02	La variedad EC-02 (Cruzamiento entre las variedades V71-51 x SP82-3530).
A₂: EC-03	La variedad EC - 03 (Cruzamiento entre las variedades V71 - 51 x SP80 – 1816).
Factor B: Inóculos MVA= (4)	
M₁:	<i>Glomus intraradices</i>
M₂:	<i>Glomus fasciculatum</i>
M₃:	<i>Glomus mosseae</i>
Testigo/Variedad	Sin inoculación artificial de MVA.
Interacciones A x B (tratamientos) = (8)	
(T1) A₁T₁	Variedad EC-02 Sin inoculación artificial de MVA
(T2) A₁M₁	Variedad EC-02 inoculada con <i>G. intraradices</i>
(T3) A₁M₂	Variedad EC-02 inoculada con <i>G. fasciculatum</i>
(T4) A₁M₃	Variedad EC-02 inoculada con <i>G. mosseae</i>
(T5) A₂T₂	Variedad EC-03 Sin inoculación artificial de MVA.
(T6) A₂M₁	Variedad EC-03 inoculada con <i>G. intraradices</i>
(T7) A₂M₂	Variedad EC-03 inoculada con <i>G. fasciculatum</i>
(T8) A₂M₃	Variedad EC-03 inoculada con <i>G. mosseae</i>

Procedimiento

Las unidades experimentales se delimitaron en parcelas comerciales de caña de azúcar de $2,5 \times 3,0$ m ($7,5$ m 2), con una distancia entre plantas de 0,5 m y entre hileras de 0,6 m. Cada parcela contó con un área bruta de aproximadamente 35 plantas, considerando un efecto borde, y un área útil central de 15 plantas destinada al muestreo. El manejo agronómico fue genérico y homogéneo para todas las parcelas, incluyendo preparación del suelo, siembra, fertilización, control de malezas, manejo fitosanitario y riego, aplicados de manera uniforme para evitar sesgos por efecto de manejo.

Variables evaluadas

Evaluación del desarrollo vegetativo de la caña de azúcar micorrizada

El desarrollo vegetativo de la caña de azúcar micorrizada se evaluó mediante cinco variables morfológicas cuantitativas: peso, longitud, diámetro, circunferencia y longitud de entrenudos. Para cada tratamiento se seleccionaron aleatoriamente cinco canutos representativos.

El peso fresco se determinó mediante el pesaje conjunto de los cinco canutos por tratamiento, utilizando una balanza de precisión, expresándose los resultados en kilogramos. La longitud se midió de forma longitudinal con cinta métrica, desde la base hasta el ápice del canuto. El diámetro se obtuvo empleando un calibrador vernier (pie de rey), ubicando el canuto en posición longitudinal para garantizar precisión en la lectura. La circunferencia se midió colocando una cinta métrica flexible alrededor del canuto en su sección media. Finalmente, la longitud de entrenudos se determinó midiendo la distancia entre nudos consecutivos mediante cinta métrica, registrándose el valor promedio por canuto.

Determinación de la nematofauna asociada a la caña de azúcar en el área experimental

La nematofauna asociada al cultivo se evaluó mediante análisis nematológicos de suelo y raíces, con énfasis en la identificación y gradación de nematodos del género *Meloidogyne* y otros nematodos fitoparásitos lesionadores de raíces.

Análisis y diagnóstico de *Meloidogyne* spp.

La presencia, grado de infestación y determinación específica de nematodos del género *Meloidogyne* se evaluó mediante el método de plantas indicadoras, utilizando calabaza (*Cucurbita* sp.) como hospedero susceptible [14].

Se tomaron muestras compuestas de suelo (≈ 2 kg) hasta 30 cm de profundidad, recolectando cuatro submuestras por parcela experimental y tratamiento. El suelo se colocó en fundas de polietileno (14 \times 22 cm), sembrándose tres semillas de calabaza por unidad experimental. Las plantas se mantuvieron en crecimiento durante aproximadamente 35 días.

Transcurrido este periodo, las raíces se extrajeron cuidadosamente, se lavaron con agua potable y se observaron bajo lupa estereoscópica (10 \times) para detectar la presencia de nódulos o agallas. El grado de infestación se determinó mediante la escala de cinco grados [15], [16].

La identificación específica se confirmó mediante el análisis de patrones perianales, realizando cortes perianales de hembras adultas y observando la segmentación radial bajo microscopio óptico, conforme a los protocolos descritos en [17].

Análisis y diagnóstico de nematodos lesionadores de raíces

Para la determinación de nematodos fitoparásitos distintos de *Meloidogyne*, se empleó el método combinado de embudo de Baermann y centrifugación-flotación, modificado por Alvarado-Soto y López (1985).

En el análisis de suelo, se procesaron 100 g por muestra, los cuales se homogenizaron en licuadora con 250 mL de agua destilada. La suspensión se centrifugó para separar el sedimento y el sobrenadante se pasó por tamices para la recuperación de nematodos.

Para el análisis de raíces, se utilizaron 10 g de raíces trozadas por muestra, montadas en embudos Baermann, realizando tres extracciones consecutivas. Los nematodos extraídos se fijaron en formalina caliente al 3% y se preservaron en viales de 25 mL.

El conteo se realizó bajo estereoscopio y la identificación morfológica bajo microscopio óptico, considerando caracteres diagnósticos como regióncefálica, estilete, esófago, bulbo medio, posición de la vulva y morfología de la cola. Se elaboraron preparaciones permanentes según el método de soluciones beaker [19].

Análisis y diagnóstico de micorrizas vesículo-arbusculares (MVA)

Inoculación micorrízica

La inoculación micorrízica de las variedades EC 02 y EC 03 de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) se realizó directamente al surco, a los 20 días después de la brotación radicular. Se utilizaron biopreparados micorrízicos constituidos por suelo estéril con 10% de materia orgánica (humus de lombriz), raíces colonizadas con aproximadamente 60% de infección interna y propágulos viables (50 esporas + 10 esporocarpos por 10 g de suelo), siguiendo la metodología propuesta por Ricardo (2021).

Aislamiento y evaluación del grado de infección micorrízica

El aislamiento y evaluación del grado de colonización micorrízica se realizaron a los 3 y 6 meses posteriores a la inoculación, conforme al procedimiento de Camprubi et al., (1987). Se recolectaron muestras de suelo y raíces por tratamiento y réplica.

Las raíces se clarificaron y tiñeron mediante el método de Phillips y Hayman (1970), mientras que las esporas del suelo se recuperaron mediante centrifugación-flotación y tamizado húmedo, según Furlan y Fortín (1975) y Abbott y Robson (1979).

Para la tinción, fragmentos de raíces (200 mg) se trataron con KOH al 10%, HCl al 15% y azul de tripán en lactoglicerina, quedando listas para observación microscópica tras el proceso de decoloración y conservación.

Observación microscópica

Las raíces teñidas se montaron en placas de vidrio con lactoglicerol y se observaron bajo microscopio óptico con objetivos de 10× y 40×, registrándose la presencia de vesículas, arbúsculos e hifas micorrízicas.

Confirmación de identidad y parámetros de micorrización

La identificación de las especies MVA se realizó mediante claves morfológicas basadas en la disposición y morfología arbúsculo-vesicular, siguiendo Abbott y Robson (1979). Se calcularon los siguientes índices: grado de micorrización (GM), longitud de raíz colonizada (LRC), potencial de inóculo (Pi) y capacidad infectiva (CI), conforme a Sieverding (1983).

Adicionalmente, se midió el espaciamiento entre vesículas y la ramificación de arbúsculos utilizando ocular micrométrico o cámara de Neubauer, según Kormanik y Mc Graw (1987). Como bioensayo complementario, se evaluó la reinfección micorrízica mediante la siembra de maíz (*Zea mays*) en suelo muestrado, de acuerdo con Ricardo (2021).

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y para la comparación de promedios entre tratamientos se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey al 5% de confianza. Para la tabulación se utilizó el software Excel® del paquete de Office®. Los datos de las variables de crecimiento vegetativo, infestación por nematodos y respuesta micorrízica se analizaron mediante el software Statgraphics versión XV.I.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso del canuto (kg)

De acuerdo con los resultados obtenidos para el peso del canuto, se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados ($p \leq 0,05$). Los mayores promedios se registraron en T2 y T6, ambos con 0,7 kg, sin diferencias estadísticas entre sí, pero superiores a T1, T5 y T7, que presentaron los menores promedios (0,4 kg). Los tratamientos T3 (0,6 kg), T4 (0,5 kg) y T8 (0,5 kg) mostraron valores intermedios, sin diferenciarse significativamente de los tratamientos de mayor o menor respuesta (Tabla 2).

Longitud del canuto (cm)

Para la longitud del canuto, se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). Los mayores promedios correspondieron a T3 (95 cm), seguido de T2 y T6, ambos con 85 cm, sin diferencias estadísticas entre estos tratamientos. En contraste, T7 presentó el menor promedio (55 cm), diferenciándose significativamente del resto. Los tratamientos T1 (55 cm), T4 (65 cm), T5 (68 cm) y T8 (60 cm) mostraron valores intermedios (Tabla 2).

Diámetro del canuto (cm)

En relación con el diámetro del canuto, los resultados evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). El mayor promedio se registró en T6 (4,1 cm), el cual fue estadísticamente similar a T2 (3,6 cm) y T3 (3,5 cm), pero superior a T4 (2,7 cm), T5 (2,2 cm) y T8 (2,5 cm), que presentaron los menores diámetros. Los tratamientos T1 (3,2 cm) y T7 (3,5 cm) mostraron valores intermedios (Tabla 2).

Circunferencia del canuto (cm)

Los resultados de circunferencia del canuto mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). Los mayores promedios se observaron en T6 (13 cm) y T2 (12 cm), sin diferencias estadísticas entre ambos. Los tratamientos T3 (11 cm), T7 (11 cm) y T1 (10 cm) presentaron valores similares entre sí. En contraste, T4 (9 cm), T8 (8 cm) y T5 (7 cm) registraron los menores promedios de circunferencia del canuto (Tabla 2).

Distancia entre nudos (cm)

Para la distancia entre nudos, se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). Los mayores promedios correspondieron a T7 (20 cm), T8 (19 cm), T2 (18 cm) y T6 (18 cm), sin diferencias estadísticas entre estos tratamientos. T3 presentó un promedio intermedio (16 cm), mientras que los menores valores se registraron en T4 (13 cm), T5 (13 cm) y T1 (11 cm) (Tabla 2).

Tabla 2

Parámetros productivos del cultivo de caña de azúcar

Tratamientos	Peso del canuto (kg)	Longitud de canuto (cm)	Diámetro de canuto (cm)	Circunferencia del canuto (cm)	Distancia entre nudos (cm)
T1	0,4 ^c	55 ^c	3,2 ^b	10 ^{ab}	11 ^d
T2	0,7 ^a	85 ^a	3,6 ^a	12 ^a	18 ^a
T3	0,6 ^{ab}	95 ^a	3,5 ^a	11 ^{ab}	16 ^{ab}
T4	0,5 ^{bc}	65 ^b	2,7 ^c	9 ^{bc}	13 ^c
T5	0,4 ^c	68 ^c	2,2 ^{cd}	7 ^c	13 ^c
T6	0,7 ^a	85 ^a	4,1 ^a	13 ^a	18 ^a
T7	0,4 ^c	55 ^d	3,5 ^{ab}	11 ^{ab}	20 ^a
T8	0,5 ^{bc}	60 ^c	2,5 ^c	8 ^c	19 ^a

Micorrización del cultivo de caña de azúcar (*S. officinarum*)

Las muestras tomadas de cada variante o tratamiento en ambas variedades de caña de azúcar, de las tres especies de micorrizas MVA, mostraron evidencias fehacientes de su colonización mediante los análisis efectuados para su detección y caracterización siguiendo los protocolos y procedimientos establecidos por Kormanik y Mc Graw (1987). De este modo fueron caracterizados tomando además en cuenta los criterios de expertos del Instituto de Ecología y Sistemática de la Academia de Ciencias de Cuba, que tuvieron acceso a réplicas de estas muestras con la finalidad de corroborar el diagnóstico presuntivo.

Caracterización anatómica de las especies de MVA re-aisladas del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La identificación taxonómica de las micorrizas vesículo-arbusculares (MVA) re-aisladas se realizó con base en las características morfológicas de las esporas de resistencia y en la anatomía de la colonización intrarradicular, evaluada mediante cortes histológicos de raíces. El análisis permitió confirmar que los aislamientos corresponden a especies previamente asignadas al género *Glomus*.

Las estructuras observadas mostraron alta similitud con *Glomus mosseae*, *Glomus fasciculatum* y *Glomus intrarradices*, caracterizadas por hifas de diámetro moderado, colonización vesicular densa, ocupando gran parte del córtex radicular, y vesículas intercelulares grandes, ovaladas, generalmente univacuoladas y de pared gruesa, concordantes con descripciones previas [27]. A continuación, se describen sintéticamente las principales características anatómicas observadas para cada especie:

Glomus mosseae

Se observaron esporocarpos de color amarillo-castaño a bronceado, agrupados en paquetes de 3 a 9 esporas, rodeados por un peridio de 9–33 μm de espesor. Las hifas principales presentaron diámetros de 8–18 μm , con paredes de 1,6–3,1 μm , asociadas a hifas finas y ramificadas de 2–7 μm de ancho y paredes menores a 1 μm .

Las esporas fueron predominantemente globosas a subglobosas, de color amarillo claro a naranja-castaño oscuro, con tamaños comprendidos entre 100 y 260 μm y un promedio de 190 μm , calculado a partir de 160 esporas analizadas, valores concordantes con lo reportado por [27].

Un rasgo diferencial considerado en este estudio fue la distancia media entre vesículas, que alcanzó 2300 μm , con una densidad aproximada de 13 vesículas· cm^{-2} de raíz (Simón y Mayet, 2017). El número de ramificaciones por arbúsculo no fue considerado debido a su alta variabilidad.

Glomus fasciculatum

Las esporas presentaron coloración que varió de amarillo pálido a amarillo-castaño claro, con formas globosas y subglobosas y tamaños entre 67 y 117 μm . Un carácter distintivo fue la

presencia de tres capas en la pared esporal, formadas secuencialmente, consistente con el modelo de diferenciación descrito para especies del género *Glomus* [27].

La distancia promedio entre vesículas fue de 1700 μm , con una densidad aproximada de 37 vesículas· cm^{-2} de raíz. Al igual que en la especie anterior, la ramificación de los arbúsculos no se consideró para el diagnóstico morfológico.

Glomus intrarradices

Las esporas mostraron una alta variabilidad cromática, desde blanco y crema pálido hasta amarillo-pardo, ocasionalmente con tonalidades verdosas. Predominaron formas globosas, subglobosas e irregulares, observándose también esporas elípticas, especialmente en aquellas extraídas de raíces colonizadas. El tamaño osciló entre 30 y 101 μm .

La pared esporal estuvo constituida por tres capas, destacándose que la capa externa se presentó únicamente en esporas juveniles y en la pared de la hifa. La distancia promedio entre vesículas fue de 1100 μm , con una densidad aproximada de 59 vesículas· cm^{-2} de raíz.

Micorrización del cultivo de caña de azúcar y la capacidad infectiva de las tres especies del género *Glomus*

A los 90 días, los mayores valores de grado de micorrización se registraron en T2 (77 %) y T6 (78 %), los cuales presentaron respuestas similares entre sí. Los tratamientos T3 (71 %) y T7 (72 %) mostraron valores ligeramente inferiores, sin diferenciarse significativamente de los tratamientos con mayor micorrización. En contraste, T4 (33 %) y T8 (36 %) presentaron los menores porcentajes de micorrización.

Esta misma tendencia se reflejó en la capacidad infectiva unitaria (CI) a los 90 días, donde T2 (1,54) y T6 (1,57) alcanzaron los valores más altos, seguidos por T3 (1,17) y T7 (1,19). Los valores más bajos correspondieron a T4 (0,37) y T8 (0,39), indicando una menor eficiencia infectiva de estos tratamientos en etapas tempranas del cultivo.

A los 180 días, se observó un incremento generalizado en el grado de micorrización en todos los tratamientos. Los valores más elevados se registraron nuevamente en T2 (91 %) y T6 (93 %), manteniendo un comportamiento similar al observado a los 90 días. Los tratamientos T3 y T7, ambos con 86 %, mostraron una micorrización elevada, aunque inferior a la de T2 y T6. Por su parte, T4 (43 %) y T8 (47 %) continuaron presentando los menores porcentajes de colonización micorrízica.

De manera consistente, la capacidad infectiva unitaria a los 180 días fue mayor en T2 y T6 (1,91), seguida de T7 (1,76) y T3 (1,71), mientras que T4 (0,63) y T8 (0,66) registraron los valores más bajos, confirmando su limitada capacidad de infección radicular (Tabla 3).

Tabla 3*Micorrización del cultivo de caña de azúcar a los 90 y 180 días de inoculadas*

Tratamientos	90 DÍAS		180 DÍAS	
	(GM %)	CI:GM/Pi	(GM %)	CI:GM/Pi
T2	77 ^a	1.54 ^a	91 ^a	1.91 ^a
T3	71 ^{ab}	1.17 ^b	86 ^{ab}	1.71 ^b
T4	33 ^c	0.37 ^d	43 ^c	0.63 ^d
T6	78 ^a	1.57 ^a	93 ^a	1.91 ^a
T7	72 ^{ab}	1.19 ^b	86 ^{ab}	1.76 ^b
T8	36 ^c	0.39 ^d	47 ^c	0.66 ^d

Leyenda: GM (%): Grado de micorrización expresado en porciento CI=GM(%) / Pi(%): Capacidad infectiva unitaria Pi (%) = cf/cm² de raíz; cf = (%) cobertura de cuerpos fructíferos

Especies de fitonematodos identificados en muestras de suelo y raíces de caña de azúcar (*S. officinarum*)

Los análisis iniciales del suelo evidenciaron la presencia de altas poblaciones de *Meloidogyne incognita*, reconocida como una de las especies más agresivas del género, acompañada por otras especies como *M. arenaria*, *M. javanica*, *M. hapla* y *M. managuensis* (Hunt et al., 2005), todas asociadas a daños severos en diversos cultivos agrícolas.

Adicionalmente, se identificaron seis géneros de nematodos lesionadores y perforadores de raíces en muestras de suelo, y tres géneros en muestras radiculares, excluyendo *Meloidogyne*. Entre estos, los géneros *Helicotylenchus*, *Dorylaimus*, *Cephalobus*, *Pratylenchus*, *Radopholus* y *Tylenchus* estuvieron asociados al cultivo de caña de azúcar, siendo *Helicotylenchus* el más abundante y *Tylenchus* el menos frecuente.

A pesar de las altas poblaciones de *Meloidogyne* detectadas en el suelo, con grado 5 según la escala de Zeck (INISAV, 2011), este género no se presentó como prevalente en las raíces de caña de azúcar, lo que evidencia la tolerancia del cultivo a estos nematodos y confirma que no actúa como hospedero preferencial. Este comportamiento constituye un atributo clave para su uso con fines fitorremediadores.

La confirmación de esta tolerancia permitió avanzar hacia la evaluación de estrategias de potenciación de la fitorremediación, mediante la micorrización con especies de MVA del género *Glomus*. A los 90 y 180 días posteriores a la inoculación, los análisis nematológicos de la rizosfera mostraron una reducción progresiva de las poblaciones de nematodos, pasando de un grado 5 al inicio del experimento a un grado 2 a los seis meses de cultivo micorrizado.

Entre las especies evaluadas, *Rhizophagus intraradices* presentó la mayor eficiencia fitorremediadora, reduciendo las poblaciones de nematodos en menor tiempo, seguida por *Glomus fasciculatum*, ambas con un comportamiento superior al de *Funneliformis mosseae*, la

cual mostró la menor efectividad. Estas diferencias estuvieron asociadas a la capacidad infectiva de cada especie micorrízica.

La correlación entre las características morfo-fisiológicas de las MVA y su comportamiento fitorremediador sugiere que la reducción del tamaño esporal, el incremento en el número de vesículas y la menor distancia entre ellas favorecen una mayor infectividad y actividad metabólica. Dado que en las vesículas se sintetizan enzimas, metabolitos, fitohormonas y micotoxinas, estos rasgos podrían explicar la mayor eficiencia observada, en concordancia con Kormanik & Mc Graw (1987).

CONCLUSIONES

La micorrización de la caña de azúcar mejoró significativamente su desempeño productivo y sanitario. Los tratamientos T2 y T6 registraron los mayores valores de crecimiento del canuto, asociados a los más altos grados de micorrización y capacidad infectiva. La identificación de especies del género *Glomus* confirmó diferencias morfo-fisiológicas que explican su eficiencia colonizadora, destacándose *Rhizophagus intraradices* por su mayor infectividad. Asimismo, el cultivo mostró tolerancia a *Meloidogyne* spp. y, en combinación con la micorrización, permitió una reducción progresiva de las poblaciones de nematodos.

REFERENCIAS

- [1] M. Liu and G. Wang, “Indoor Fire Simulation in Low-Rise Teaching Buildings Based on BIM–FDS,” *Fire*, vol. 6, no. 5, p. 203, May 2023, doi: 10.3390/fire6050203.
- [2] D. Álvarez, J. Botina, A. Ortiz, and L. Botina, “Evaluación nematicida del aceite esencial de Tagetes zypaquirensis en el manejo del nematodo Meloidogyne spp,” *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 33, no. 1, pp. 22–33, 2016, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n1/v33n1a03.pdf>
- [3] C. Mingot-Ureta, F. Lopez-Moya, and L. Lopez-Llorca, “Worldwide strains of the nematophagous fungus Pochonia chlamydosporia are endophytic in banana roots and promote plant growth,” *Agronomy*, vol. 10, no. 9, pp. 1–21, 2020, doi: 10.1101/2020.06.10.144550.
- [4] M. Peña-Prades *et al.*, “Nematodos fitoparásitos asociados al cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en la provincia Guatánamo, Cuba,” *Cultivos Tropicales*, vol. 39, no. 1, pp. 7–14, 2018.
- [5] M. A. Da Silva Campos, “Bioprotection by arbuscular mycorrhizal fungi in plants infected with Meloidogyne nematodes: A sustainable alternative,” *Crop Protection*, vol. 135, p. 105203, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.cropro.2020.105203.
- [6] P. Tomar *et al.*, “Integrating plant defense responses in managing nematode threats for agricultural sustainability: A review,” *Journal of Natural Pesticide Research*, vol. 15, p. 100174, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.napere.2025.100174.
- [7] M. U. Rahman, X. Zhong, M. Uzair, and B. Fan, “Application of fungi as biological control strategies for nematode management in horticultural crops,” *Phytopathology Research*, vol. 6, no. 1, p. 38, Jul. 2024, doi: 10.1186/s42483-024-00257-6.
- [8] L. Grosso Dalúz, M. G. Romagnoli, M. D. Arana, and P. L. Albornoz, “Micorriza arbuscular en dos especies de Anemia (Anemiaceae) con diferentes requerimientos ecológicos,” *Lilloa*, pp. 263–275, Jul. 2025, doi: 10.30550/j.lil/2081.
- [9] M. A. Lara-Calderón, Á. F. C. Boada, G. M. M. Giler, and V. C. Cedeño, “Efecto de la inoculación con tres especies de hongos micorrízicos vesículo arbusculares, en la producción primaria de pasturas del género Brachiaria,” *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, vol. 7, no. 1, pp. 751–763, Apr. 2024, doi: 10.34188/bjaerv7n1-058.
- [10] H. I. Pérez Iglesias, I. Rodriguez Delgado, and R. M. García Batista, “Principales enfermedades que afectan el cultivo de la caña de azúcar en Ecuador,” *Revista Científica Agroecosistemas*, vol. 12, no. 3, pp. 53–60, 2024.
- [11] R. García Culqui, C. Jácome Pilco, Lady Guevara Narváez, and T. Moreta Guangasi, “Revalorización del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como residuo

- importante para la agroindustria,” 593 *Digital Publisher CEIT*, vol. 8, no. 3, pp. 134–148, 2023.
- [12] Requeiro Almeida R., García Bacallao J. M., and Padilla Gómez A., “Contribuciones a la producción sostenible de caña de azúcar. Revisión desde un programa de maestría,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 4, pp. 97–106, 2022.
- [13] V. Ventura, J. González, I. Miranda, D. Hernández, and M. Rodríguez, “Biocarbón, humus y micorrizas: efectosobre *Dioscorea alata* L. e infestación y reproducción de nematodo agallero encondiciones semicontroladas,” *Rev Prot Veg*, vol. 38, pp. 1–7, 2023.
- [14] L. Sánchez, “Cepas bacterianas aisladas de nematodos para el control biológico de *Meloidogyne incognita*,” Tesis doctoral, Universidad de La Habana, La Habana, 2023.
- [15] W. M. Zeck, “El esquema de valoración del ataque de cecidios radicícolas,” *Pflanzenchutz Nachrichten Bayer*, vol. 24, no. 1, pp. 147–150, 1971.
- [16] W. Püntener, *Manual para ensayos de campo de protección vegetal*, 2 ed. Basilea, Suiza, 1981.
- [17] Annales Nematoda, “Crop Protection Nematoda. Taxonomic and Clasification.,” *Annales Science Nature*, vol. 98, no. 4, p. 331, 2014.
- [18] M. Alvarado-Soto and R. López, “Extracción de algunos nematodos fitoparasitos mediante modificaciones de las técnicas de centrifugación-flotación y embudo de Baermann modificado /*,” *Agronomía Costarricense*, vol. 9, no. 2, pp. 175–180, 1985.
- [19] B. Zuckerman, W. Mai, and L. Krusberg, *Plant Nematology Laboratory Manual*. University of Massachusetts Agricultural Experiment Station, 1990.
- [20] F. Á. S. Ricardo, “Cultivo agroecológico del banano y plátano / Agroecological culture of the banana crop,” *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, vol. 4, no. 4, pp. 4950–4972, Oct. 2021, doi: 10.34188/bjaerv4n4-013.
- [21] A. Camprubi, C. Calvet, V. Estaun, and J. Pera, “Aislamiento de un hongo formador de micorrizas vesiculo-arbusculares y ensayo de su efectividad en crisantemo y fresa,” *Investigación agraria. Producción y protección vegetales*, vol. 2, no. 3, pp. 281–294, 1987.
- [22] J. M. Phillips and D. S. Hayman, “Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection,” *Transactions of the British Mycological Society*, vol. 55, no. 1, pp. 158-IN18, Aug. 1970, doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3.
- [23] V. Furlan and J. A. Fortín, “Un sistema de flotación-burbujeo para la recolección de esporas de Endogonaceae de suelo tamizado,” *Naturaliste Canadien*, vol. 102, no. 5, pp. 663–667, 1975.

- [24] L. Abbott and A. Robson, “A Quantitative Study of the Spores and Anatomy of Mycorrhizas Formed by a Species of Glomus, With Reference to Its Taxonomy,” *Aust J Bot*, vol. 27, no. 4, pp. 363–375, Aug. 1979, doi: 10.1071/BT9790363.
- [25] E. Sieverding, *Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular en el laboratorio*. 1983.
- [26] P. Kormanik and A. Mc Graw, “Quantification of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal in Plant Roots,” *Methods and Principles of Mycorrhizal Research, American Phytopathological Society*, pp. 37–45, 1987.
- [27] Y. Perez, “The international culture collection of VA mycorrhizal fungi (INVAM),” FAO.