



Foto: Banco de fotos Agrosavia

¿Por qué usar hongos formadores de micorrizas arbusculares en caña de azúcar para panela en Nariño?

Andrea María Peñaranda Rolón
Diana Paola Serralde Ordóñez
María Margarita Ramírez Gómez

Peñaranda Rolón, Andrea María

¿Por qué usar hongos formadores de micorrizas arbusculares en caña de azúcar para panela en Nariño?. / Andrea María Peñaranda Rolón; Diana Paola Serralde Ordóñez y María Margarita Ramírez Gómez – Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2022.

70 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye ilustraciones, gráficos y referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-740-622-1

ISBN e-Book: 978-958-740-621-4

1. *Saccharum officinarum* 2. Técnicas de cultivo 3. Micorrizas arbusculares 4. Tolerancia a las plagas 5. Trasplante 6. Nariño (Colombia). I. Serralde Ordóñez, Diana Paola II. Ramírez Gómez, María Margarita.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia

Centro de Investigación Tibaitatá, Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Cundinamarca.
Código postal 250047, Colombia.

Centro de Investigación Obonuco, Km 5 vía Pasto–Obonuco (Obonuco, Nariño).

Esta publicación es resultado del proyecto “Fortalecimiento del sector panelero mediante la investigación agrícola y agroindustrial en el departamento de Nariño” BPIN 2013000100280, financiado por el Sistema General de Regalías, de la Gobernación de Nariño.

Gobernación de Nariño

Jhon Alexander Rojas Cabrera

Gobernador de Nariño

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

Edgar Mauricio Ortiz Botina

Secretario de Agricultura

Autoras

Andrea María Peñaranda Rolón, Diana Paola Serralde Ordóñez y María Margarita Ramírez Gómez

Colección Alianzas Agrosavia

Tipología: Manual

Primera edición: diciembre de 2022, 3.000 ejemplares

Publicado en Mosquera (Cundinamarca)



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Preparación editorial: Editorial Agrosavia

editorial@agrosavia.co

Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Coordinación editorial: Felipe Solano Fitzgerald

Corrección de estilo: Sebastián Montero

Fotos: Andrea María Peñaranda, Banco de fotos de Agrosavia, Carlos Felipe González, María Margarita Ramírez, Urley Adrián Pérez.

Diseño, diagramación: Julián Hernández – Taller de diseño

Impresión: Imagen Editorial S.A.S.

Citación sugerida: Peñaranda Rolón, A. M., Serralde Ordóñez, D. P., & Ramírez Gómez, M. M. (2021). *¿Por qué usar hongos formadores de micorrizas arbusculares en caña de azúcar para panela en Nariño?* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7406214>

Cláusula de responsabilidad: Agrosavia no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Mayor información: Línea de atención al cliente: 01 8000 121515

atencionalcliente@agrosavia.co - <https://www.agrosavia.co/>



Foto: Banco de fotos Agrosavia



Contenido

Agradecimientos	7
Introducción	9
1. ¿Qué son las micorrizas y cómo funcionan?.....	15
2. ¿Qué es la simbiosis?	19
3. ¿Qué Hongos Formadores de Micorriza Arbusculares encontramos en suelos paneleros de Nariño?.....	25



4. ¿Cuál es el efecto de la inoculación en vivero?	33
5. ¿Cómo se comportaron los HFMA en campo?	45
6. ¿Cuáles son las ventajas económicas de usar HFMA?.....	53
Conclusiones	59
Las autoras.....	69



Foto: Gabriel David Róveda



Agradecimientos

Esta cartilla es producto del trabajo de investigación realizado por un equipo interdisciplinario de profesionales comprometidos con el desarrollo agropecuario y el manejo sostenible del suelo del país. El propósito es mejorar la capacidad productiva de los cultivos mediante alternativas tecnológicas como el uso de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA).

El equipo de trabajo agradece la ejecución del proyecto de investigación titulado “Recomendaciones de fertilización biológica para el cultivo de caña panelera en el departamento de Nariño”, el cual pertenece al Macroproyecto “Fortalecimiento del sector panelero mediante la investigación agrícola y agroindustrial en el departamento de Nariño” BPIN 2013000100280, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia y el financiamiento al Sistema General de Regalías (SGR)-Gobernación de Nariño.

A los productores Rafael Román Martínez y Arvey Alexander Darío Castro por su disposición y apoyo en el establecimiento y mantenimiento de los ensayos en campo.

A las secretarías de Agricultura municipales y Umatas de las localidades donde se ejecutaron las actividades del proyecto.

A la Secretaría de Agricultura de la Gobernación de Nariño.

A los Centros de Investigación de Obonuco y Tibaitatá de Agrosavia.

A los profesionales de apoyo y operarios vinculados al proyecto que participaron en la ejecución de las diferentes actividades de campo.





Introducción

Uno de los problemas más importantes del sistema de producción de caña de azúcar para producción de panela en Colombia está relacionado con los altos costos de fertilización y los desbalances nutricionales del cultivo. La producción tradicional en Nariño hace que esta práctica cultural se realice sin considerar un análisis de suelos y aplicando solamente algunas enmiendas y fertilizantes compuestos, que generan altos costos de producción y desbalance de nutrientes en el suelo y en el cultivo. Con el propósito de resolver esta problemática, el proyecto “Fortalecimiento del sector panelero mediante investigación e innovación agrícola y agroindustrial en el departamento de Nariño” planteó como uno de sus objetivos hacer “recomendaciones de fertilización biológica para el cultivo de caña panelera en el departamento de Nariño”, con el fin de mejorar la nutrición de caña para panela, reduciendo los riesgos de altos costos de producción, contaminación del ambiente y pérdida de inocuidad de la panela. La alternativa considerada fue el uso de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA), que son microorganismos benéficos que se asocian a la raíz de la planta para mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes del suelo, independientemente de la fuente de la que provengan (química, mineral u orgánica).

Una de las características más relevantes del cultivo de la caña panelera en el país es su área sembrada. Según cifras de la Encuesta Nacional Agropecuaria para el año 2015, entre los cultivos permanentes, excluyendo a los frutales, se ubicó como tercero luego del café y el plátano, con un total de 167.711 hectáreas (ha) plantadas y una producción total de 990.908 toneladas (t) de panela. El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, 2021) reportó un área sembrada nacional de 201.548 ha para 2019, con un área cosechada de 183.350 ha y una producción de panela de 1'162.397 t y para 2020, 192.863 ha sembradas, 165.980 ha cosechadas y una producción de 1'085.670 t de panela.

En el departamento de Nariño, la producción no ha sido estable a través del tiempo. Se han observado incrementos paulatinos en el área sembrada hasta el 2012 que alcanzaron las 15.000 ha. Posteriormente, se presentaron reducciones en el área sembrada y en el 2016 solo se sembraron 11.000 ha, pero en 2016 y 2017 se superaron las 17.000 ha. En forma similar, la producción de panela fue variable durante estos años, que logró 127.852 t de caña en 2017 (figura 1). El MADR (2021) reporta para 2019 un área sembrada de 14.538 ha, con un área cosechada de 13.144 ha y una producción de 10.034 t de caña, y para 2020, de 14.537 ha sembradas, 11.720 ha cosechadas y una producción de 64.460 t de caña.

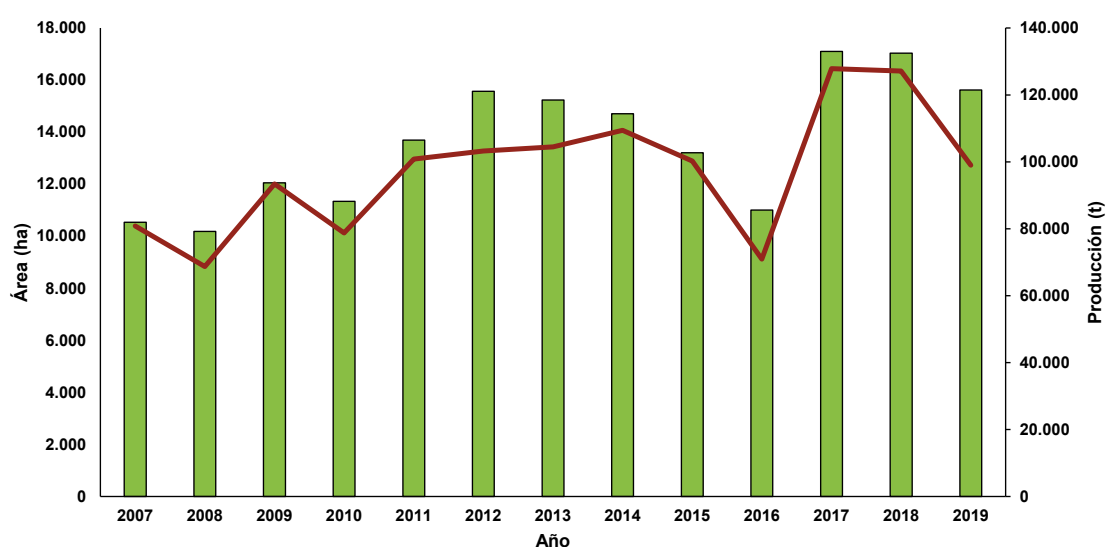


Figura 1. Área sembrada y producción de caña para panela en Nariño.

Fuente: Agronet (2021).

En cuanto al rendimiento en el departamento de Nariño, este fluctuó entre 7,7 t y 6,3 t por hectárea, con un promedio de 7,1 t ha⁻¹ entre 2007 y 2019 (figura 2) (MADR, 2021).

Respecto al total de áreas sembradas de caña de azúcar para producción de panela de acuerdo con el número de hectáreas por municipio, se observa que aproximadamente en el 70 % del departamento de Nariño se produce caña panelera, que en esas zonas el 80 % tiene áreas sembradas inferiores a 1.000 ha y que el 20 % tiene entre 1.000 y 4.000 ha de caña panelera sembradas (figura 3).

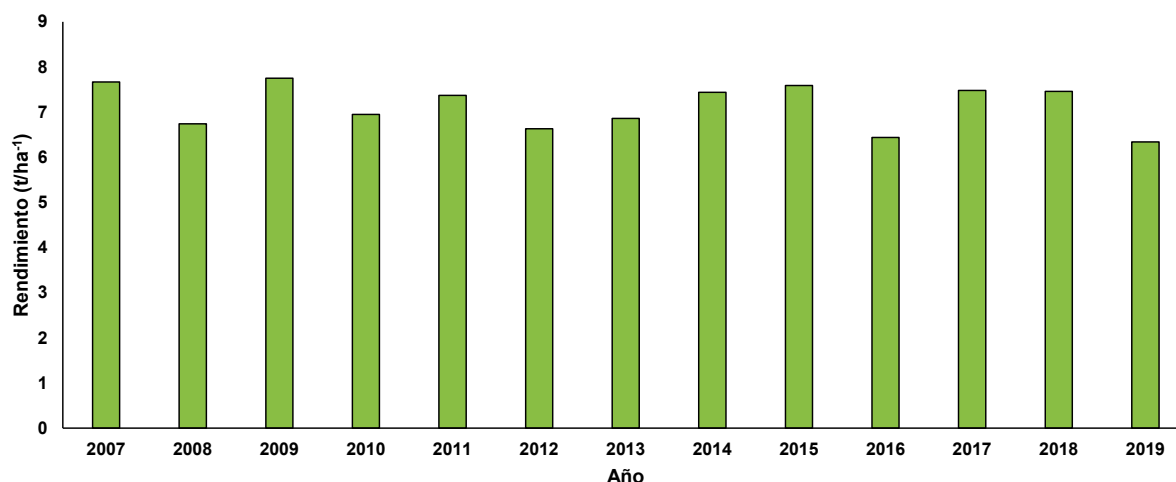


Figura 2. Rendimiento de panela en Nariño (t ha⁻¹).

Fuente: Agronet (2021).

En este contexto, el documento tiene como objeto presentar los principales resultados de investigación del proyecto mencionado, con el cual se propuso identificar la capacidad natural de la caña panelera para asociarse a microorganismos benéficos del suelo como los Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) y seleccionar en vivero y campo las mejores asociaciones de HFMA con capacidad para reducir la fertilización de síntesis química en el cultivo de la caña de azúcar para producción de panela. En la figura 4 se presenta un esquema representativo del proceso de investigación realizado.

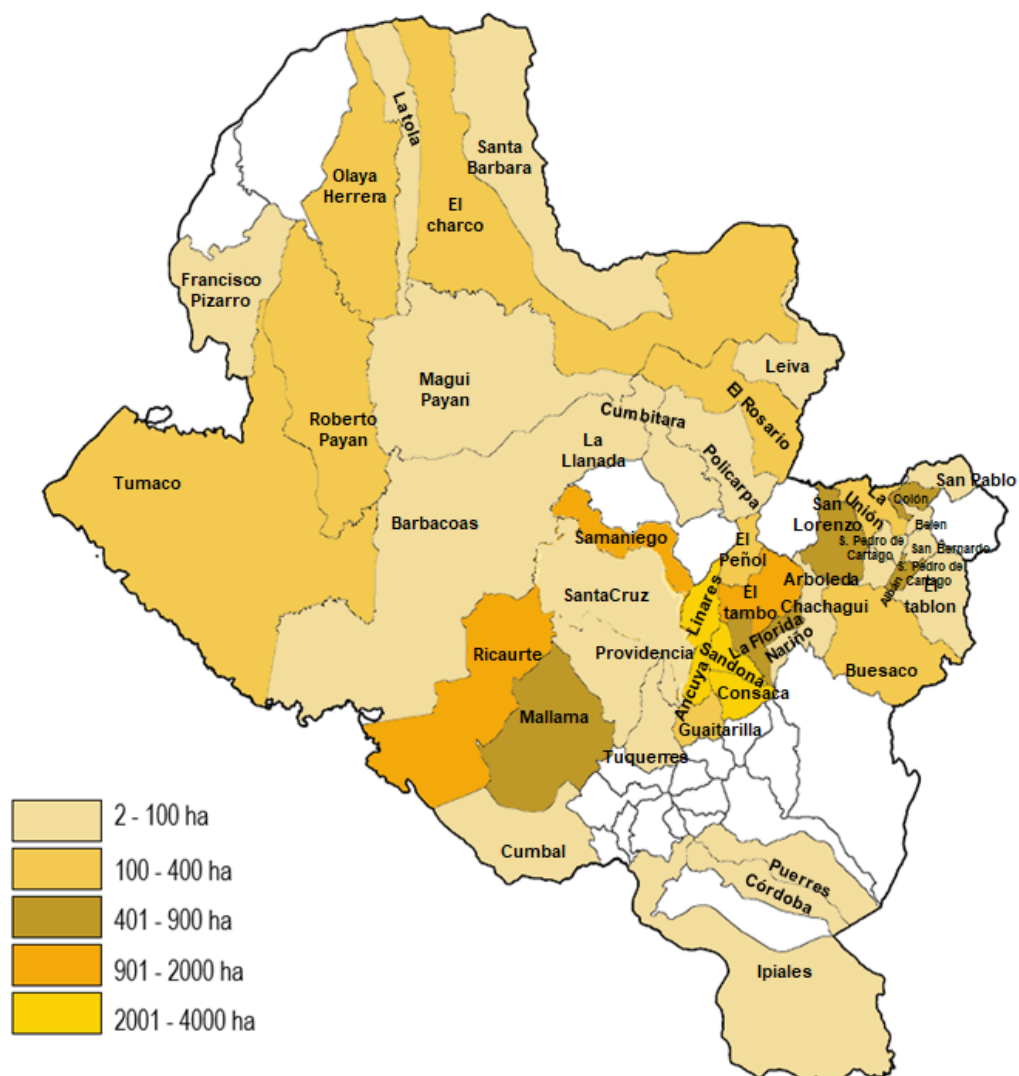


Figura 3. Mapa de distribución de áreas sembradas con caña de azúcar para producción de panela en el departamento de Nariño.

Fuente: Elaboración propia con base en Agronet (2019).



Figura 4. Proceso de investigación en el marco del proyecto “Fortalecimiento del sector panelero mediante investigación e innovación agrícola y agroindustrial en el departamento de Nariño”

Fuente: Elaboración propia





1. ¿Qué son las micorrizas y cómo funcionan?

¿Qué conocemos de las micorrizas?

Las micorrizas son el resultado de la asociación simbiótica entre una planta y una o más especies de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA). Los HFMA son organismos microscópicos, que no pueden verse a simple vista, que habitan en la mayoría de los suelos del planeta: desde los que tienen altos contenidos de nutrientes, hasta aquellos que tienen muy baja disponibilidad; suelos con altas o bajas temperaturas, con diversa capacidad de retención de humedad, y con presencia de sales o metales pesados, así como en diferentes paisajes y topografías. Estos hongos tienen la capacidad de asociarse con más del 80 % de las plantas cultivables y en un alto porcentaje de las plantas silvestres (Brundrett & Tedersoo, 2018; Diederichs & Moawad, 1993; Janos, 1980).

Las esporas que están en el suelo germinan y producen una especie de raicilla muy delgada llamada *hifa* que llega hasta la raíz, entra en ella (figura 5a) y forma una estructura especializada llamada *arbúsculo* (figura 5b), para producir nuevas hifas, las cuales salen a explorar el suelo y a producir esporas (figura 5c y 5d). Ahora bien, como el hongo no puede producir nuevas esporas sin presencia de una raíz de plantas, se les llama simbioses obligados (Gianinazzi-Person & Gianinazzi, 1983; Sieverding 1991, 1986; Varma & Hock, 1995).

Los hongos y la nutrición

El suelo contiene una gran cantidad de microorganismos que pueden beneficiar a las plantas. Un grupo muy importante es el de los Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares, los cuales facilitan la nutrición y el crecimiento de las plantas.

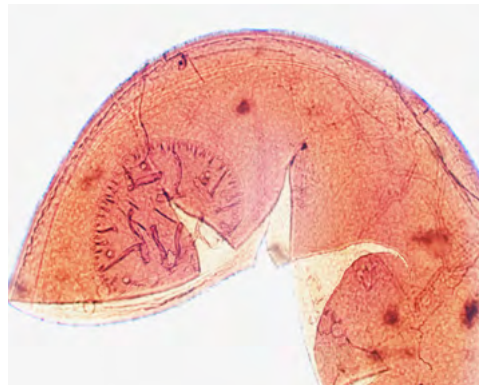
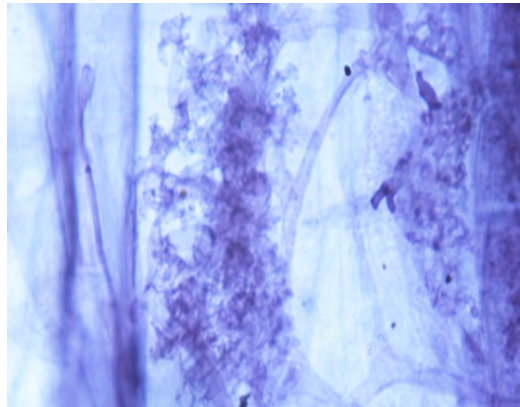
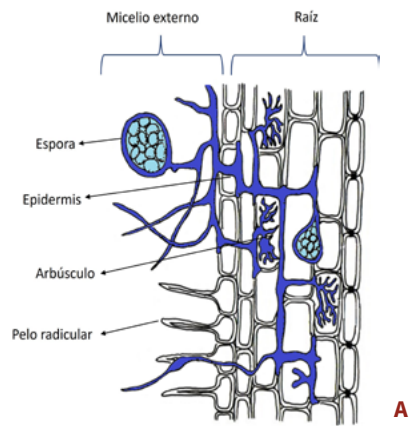


Figura 5. Proceso de simbiosis y estructuras del hongo. a. Raíz micorrizada; b. Arbúsculo; c y d. Esporas.

Fuente: Elaboración propia con base en https://www.plantasyhongos.es/bw/micorriza_01a.jpg

Fotos: Urley Adrián Pérez y María Margarita Ramírez





2. ¿Qué es la simbiosis?

¿Cómo se ayudan las diferentes especies en la naturaleza?

La simbiosis es la unión de dos organismos para beneficiarse mutuamente (figura 6), que en el caso de la micorriza (unión de una raíz de la planta y un HFMA) se da de esta forma:

1. La planta recibe del hongo nutrientes y agua que toma desde zonas lejanas de la raíz o de poros en donde la raíz no puede entrar por su tamaño.
2. El hongo recibe carbohidratos para formar las estructuras (hifas, esporas, vacuolas) que le permiten crecer y multiplicarse (figura 5a).

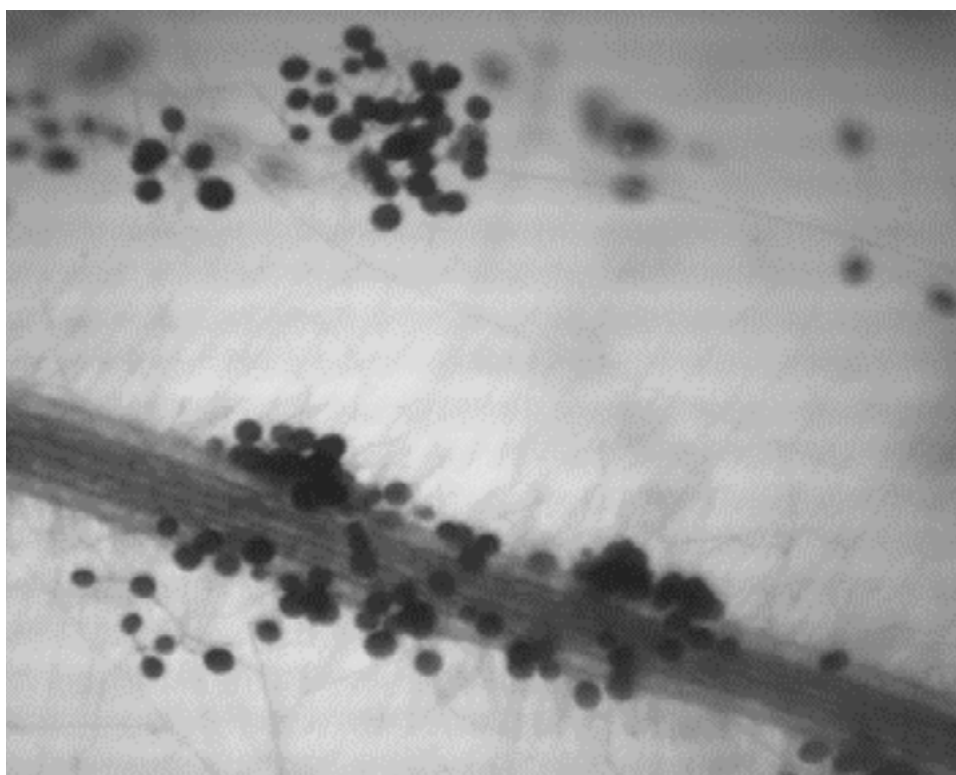


Figura 6. Asociaciones simbióticas planta-Hongo Formador de Micorrizas Arbusculares (HFMA).

Foto: Urley Adrián Pérez

Este intercambio bidireccional de nutrientes se realiza en el arbusculo, que es una estructura que puede permanecer entre 8 y 15 días en la raíz y luego se reabsorbe sin afectar la célula (Varma & Hock, 1995). A continuación, se presentan los principales beneficios de esta asociación que se han estudiado en diversos ecosistemas y agroecosistemas.

Principales beneficios de la simbiosis entre la raíz y los HMFA

Aumento de la eficiencia en la toma de nutrientes y agua

Se ha encontrado que un cultivo micorrizado puede reducir en 50 % la aplicación de fertilizantes químicos y orgánicos, ya que las hifas del HFMA toman permanentemente nutrientes de un volumen de suelo mayor que el que pueden explorar las raíces. Así, las hifas del HFMA se convierten en una extensión de la raíz para tomar nutrientes y agua (Godlbald & Sharrock, 2003; Ramírez, 2003; Ramírez et al., 2008a, 2008b, 2011; Richardson et al., 2003; Roveda et al., 2004a, 2004b) (figura 7).

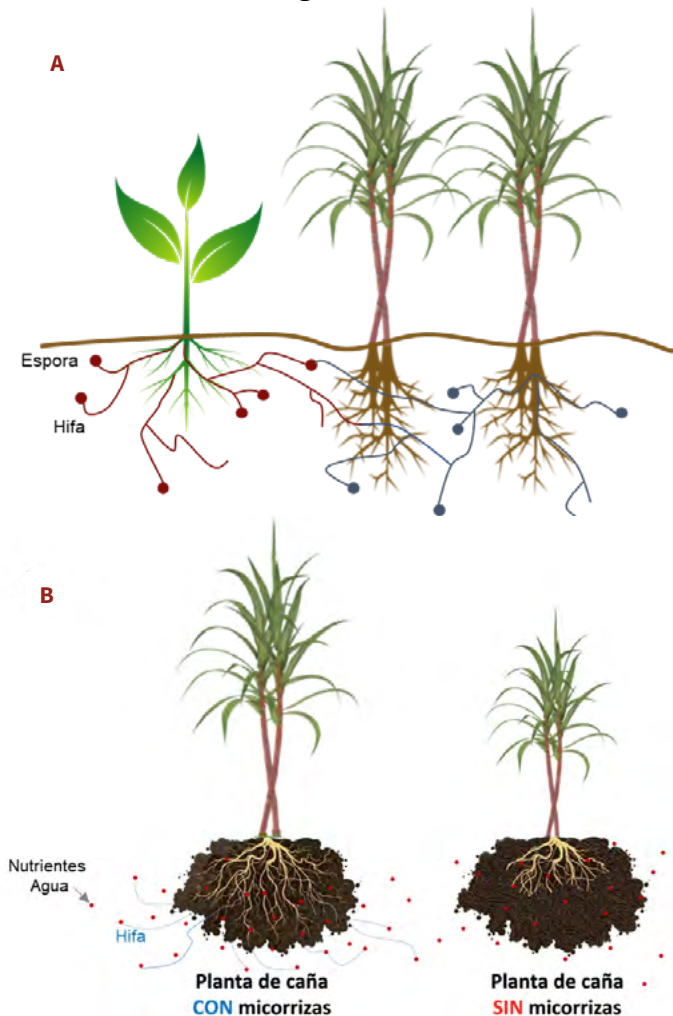


Figura 7. Distribución de las raíces y de las hifas del hongo en el suelo. a. Redes de HFMA e interconexión entre plantas para compartir nutrientes y agua; b. Crecimiento de raíces en plantas con y sin HFMA.

Fuente: Elaboración propia con base en Sanders & Croll (2010) y Gandía (2013).

Tolerancia a plagas y enfermedades

La mejor nutrición y la activación temprana de mecanismos de defensa de la planta hacen que se pueda defender más rápido y con mayor contundencia cuando es afectada por plagas o enfermedades, de modo que se convierte en un mecanismo de mitigación del efecto de plagas y enfermedades (Jacobsen, 1995; Ramírez & Rodríguez, 2012).

Tolerancia a condiciones de estrés abiótico

La mayor capacidad de toma de agua y nutrientes favorece la respuesta de la planta al estrés, así como la inducción de defensas frente al estrés abiótico, gracias a la presencia de los HFMA, que protegen y permiten una mayor adaptación/resiliencia de la planta frente a fenómenos como el cambio climático (Smith & Gianinazzi-Pearson, 1998; Smith & Read, 2008).

Mejoras en la estructura del suelo

Los HFMA producen una proteína llamada *glomalina*, que actúa como un pegante de las partículas de suelo, de forma que favorece la formación y estabilización de su estructura, lo cual mejora su almacenamiento de agua en el suelo y la distribución de nutrientes. Este factor se asocia con la mayor capacidad de los suelos para inmovilizar carbono y así mitigar los efectos del cambio climático (Simard & Durall, 2004).

Promoción de actividad de otros microorganismos benéficos

Debido al traspaso de una alta cantidad de carbohidratos de la parte aérea a la raíz, los exudados de esta enriquecen con azúcares la zona cercana a ella, lo que hace que muchos microorganismos benéficos se multipliquen en mayor medida y puedan actuar como promotores de crecimiento, en la nutrición o en el control de plagas y enfermedades de la planta (Smith & Gianinazzi-Pearson, 1998; Smith & Read, 2008).

Inmovilización de metales pesados

Muchos estudios han demostrado que los HFMA tienen la capacidad de tomar los metales pesados (que afectan la salud de los consumidores y, en mayor o menor medida, el desarrollo de las plantas) e inmovilizarlos en las hifas que están en el suelo o que ingresan a la raíz de la planta, con lo cual impiden que lleguen a la parte cosechable (Boorbooriand & Zhang, 2022; Ferrol et al., 2016).

Incremento en biodiversidad del sistema

Se presenta por la promoción de crecimiento de macroorganismos benéficos y por el aumento en la diversidad de especies vegetales debido a la mejor distribución y uso de nutrientes en el sistema. Las plantas micorrizadas se pueden interconectar a través de las hifas y de esta forma compartir nutrientes y agua (Smith & Gianinazzi-Pearson, 1998; Smith & Read, 2008) (figura 7a).

Mejora la competitividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción

La micorrización de los cultivos tiene efectos positivos en la competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción debido a que reduce los costos, incrementa la producción y mejora la calidad e inocuidad de los productos (Smith & Gianinazzi-Pearson, 1998c; Smith & Read, 2008).

Aportes de los HFMA a los agricultores

La simbiosis de HFMA con plantas de caña de azúcar para panela puede generar múltiples beneficios a los agricultores, como incrementos en producción de caña y panela, reducción de costos de fertilización por el aumento de la eficiencia en la toma de nutrientes y agua, así como reducción de los efectos negativos de los estreses bióticos y abióticos en el cultivo. El ambiente se favorece por la reducción en el uso de fertilizantes de síntesis química, lo cual se refleja en la disminución de la contaminación de suelos y agua, por una parte, y de la generación de gases efecto invernadero, por otra.





3. ¿Qué Hongos Formadores de Micorriza Arbusculares encontramos en suelos paneleros de Nariño?

¿Tenemos HFMA en los suelos paneleros de Nariño?

El primer paso para desarrollar una alternativa de fertilización biológica fue hacer un reconocimiento de la presencia y diversidad de los HFMA en suelos sembrados con caña para panela en los municipios de Sandoná, Ancuya, Linares y El Tambo, del departamento de Nariño.

Con este objetivo, se realizó un muestreo de suelos y raíces de caña panelera en 12 fincas productoras de Nariño. Específicamente, se tomaron muestras compuestas (1 kg de suelo rizosférico recogido de por lo menos 10 plantas), dependiendo de la diversidad de suelos, paisajes y topografías. Las muestras se hicieron a una profundidad de entre 0 cm y 30 cm, en cultivos de caña en diferentes etapas de crecimiento y fueron enviadas al laboratorio de química de suelos y al Laboratorio de Microbiología de Suelos de Agrosavia, C. I. Tibaitatá. En cada punto de muestreo se determinaron las coordenadas geográficas empleando un GPS (figura 8).



Figura 8. Distribución de toma de muestras de suelo y raíces en campo.

Foto: Carlos Felipe González

Con base en esta información y analizando la colonización de raíces de caña y el número de esporas en suelos, fue posible determinar si la simbiosis se establece en forma natural y seleccionar los mejores aislamientos de HFMA para este sistema de producción en Nariño. Así, se identificaron los aislamientos que se presentan con mayor frecuencia, pues son estos los que potencialmente están más adaptados a las condiciones de suelo, clima y manejo agronómico en las que se desarrolla el cultivo.

Posteriormente, a partir de la información recogida, se calculó el índice de riqueza para el departamento con base en la propuesta Margalef, lo cual nos permite estimar la diversidad de los individuos de las diferentes especies con respecto al número de individuos total de las fincas analizadas en cada municipio con esta ecuación:

$$I = (S-1)/(\ln N)$$

Donde,

S: número de especies encontradas.

N: número total de individuos de todas las especies.

Según este índice, valores por debajo de 2 son considerados de baja diversidad y por encima de 5 como sistemas con alta diversidad de especies (Valdez et al., 2018).

Caracterización química de suelos

Para conocer en detalle las características de los lugares seleccionados, se realizó un análisis químico de los suelos donde se tomaron las muestras con los siguientes métodos para determinar:

- ◆ pH (potenciómetro: agua 1:1).
- ◆ Materia orgánica (Walkey and Black).
- ◆ Fósforo disponible (P) (Bray II).

- ◆ Azufre disponible (fosfato monobásico de calcio).
- ◆ Acidez intercambiable (Al+H) (Método KCl).
- ◆ Aluminio intercambiable (Al) (Método KCl).
- ◆ Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable (acetato de amonio 1N pH 7,0).
- ◆ Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE) (suma de cationes).
- ◆ Conductividad eléctrica (conductímetro suelo: agua 1:2,5).

Asimismo, para caracterizar la presencia y diversidad de HFMA se evaluaron tres variables:

1. Número de esporas g-1 de suelo y los morfotipos presentes en el suelo, para lo cual se empleó el método de Genderman & Nicolson (1963).
2. Porcentaje de colonización de raíces, mediante el método de Phillips & Hayman (1970).
3. Aislamiento e identificación morfológica de esporas.

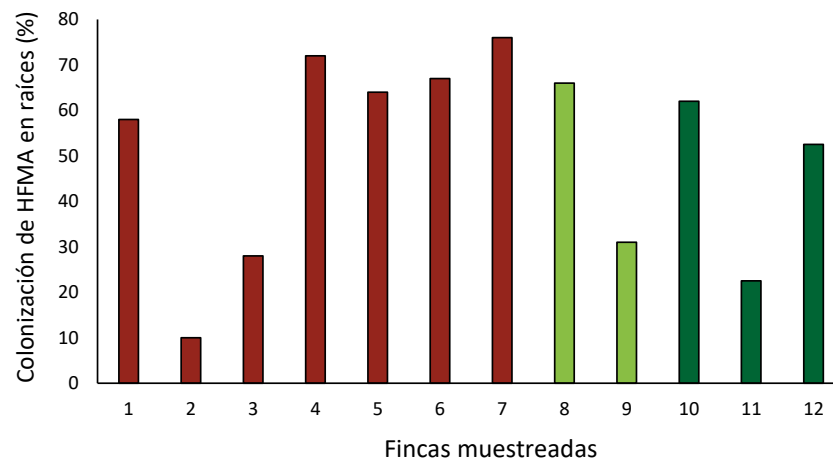
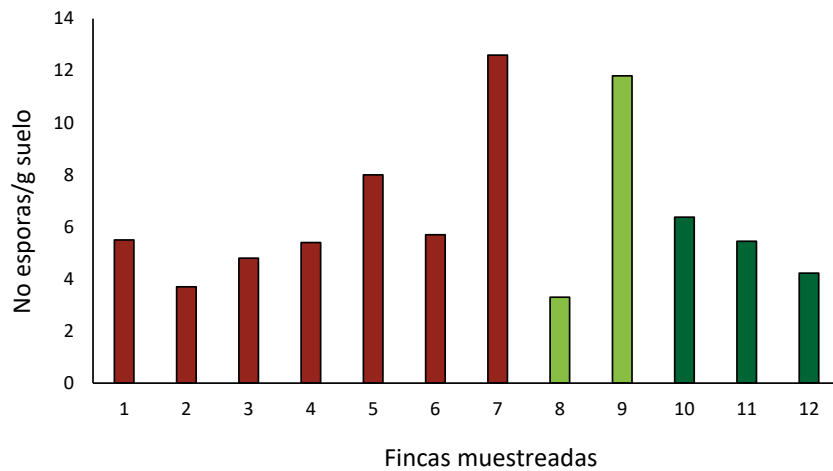
Presencia de HFMA en los suelos paneleros de Nariño

Los HFMA en los cultivos de caña de azúcar para panela en Nariño

De acuerdo con los resultados de la primera fase de investigación, los cultivos de caña de azúcar para panela analizados en los municipios de Sandoná, Ancuya, Linares y El Tambo, del departamento de Nariño, presentan HFMA en proporciones similares a las reportadas para el mismo sistema productivo en otras regiones de Colombia.

Los resultados con respecto a la variable número de esporas (figura 9) mostraron un promedio de 6,4 esporas g suelo-1, con valores mínimos de 3 esporas g-1 y máximos de 13 esporas g-1. Esto indica que efectivamente existen comunidades de HFMA en zonas productoras de caña y que es similar a los reportados en otras zonas productoras de caña del país, como la hoya del río Suárez. Sin embargo, cabe anotar que el número es relativamente bajo comparado con el número de esporas encontradas en los Andes colombianos asociados al sistema de producción de uchuva, entre los 1.900 y 2.700 m.s.n.m., donde se hallaron entre 20 y 120 esporas 10 g suelo-1 en época húmeda y entre 127 y 1,5231 esporas 10 g suelo-1 en época seca (Ramírez, 2014; Ramírez et al., 2019).

En cuanto al porcentaje de colonización de HFMA (figura 9), se encontró que la totalidad de muestras de raíz analizadas presentaron algún tipo de colonización, con porcentajes que variaron entre 10 % y 76 %. El promedio en todas las fincas fue superior al 51 %, lo cual indica que las plantas de caña para panela son capaces de establecer una relación simbiótica con HFMA.



Linare

Sandón

El Tambo

Figura 9. Análisis simbiótico, número de esporas-g-1 de suelo seco y colonización de HFMA en raíces.

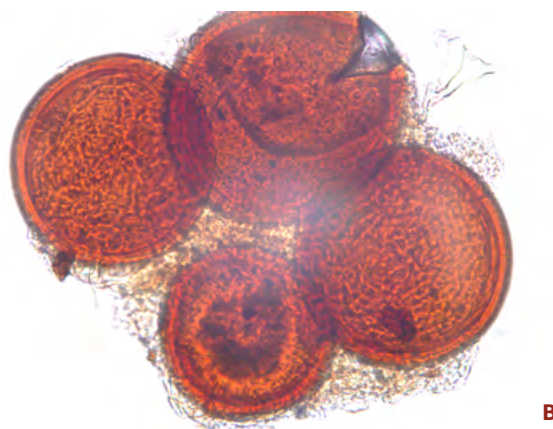
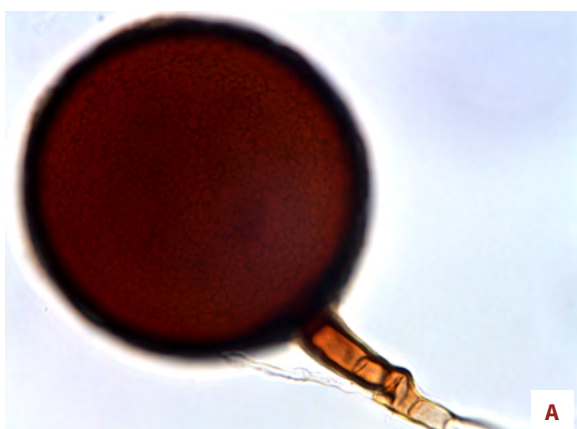
Fuente: Elaboración propia

Diversidad de los HFMA en Nariño

Con base en los resultados reportados en el apartado anterior, los HFMA hallados se clasificaron morfológicamente a nivel de género y se encontraron ocho morfotipos:

- ◆ Seis pertenecen a la familia de los Glomeraceae, en la cual se observó una alta presencia de especies de *Glomus macrocarpum* (75 % de las muestras analizadas) y *Acaulospora* sp.
- ◆ Uno a la familia Diversisporaceae.
- ◆ Uno a la familia Acaulosporaceae.

Específicamente, en el municipio de Linares se encontraron dos morfotipos, que pertenecen a los géneros de *Claroideoglomus* sp. y *Funneliformis* sp. En la figura 10 se muestran algunas de las morfoespecies aisladas en suelos de Sandoná y de Linares.



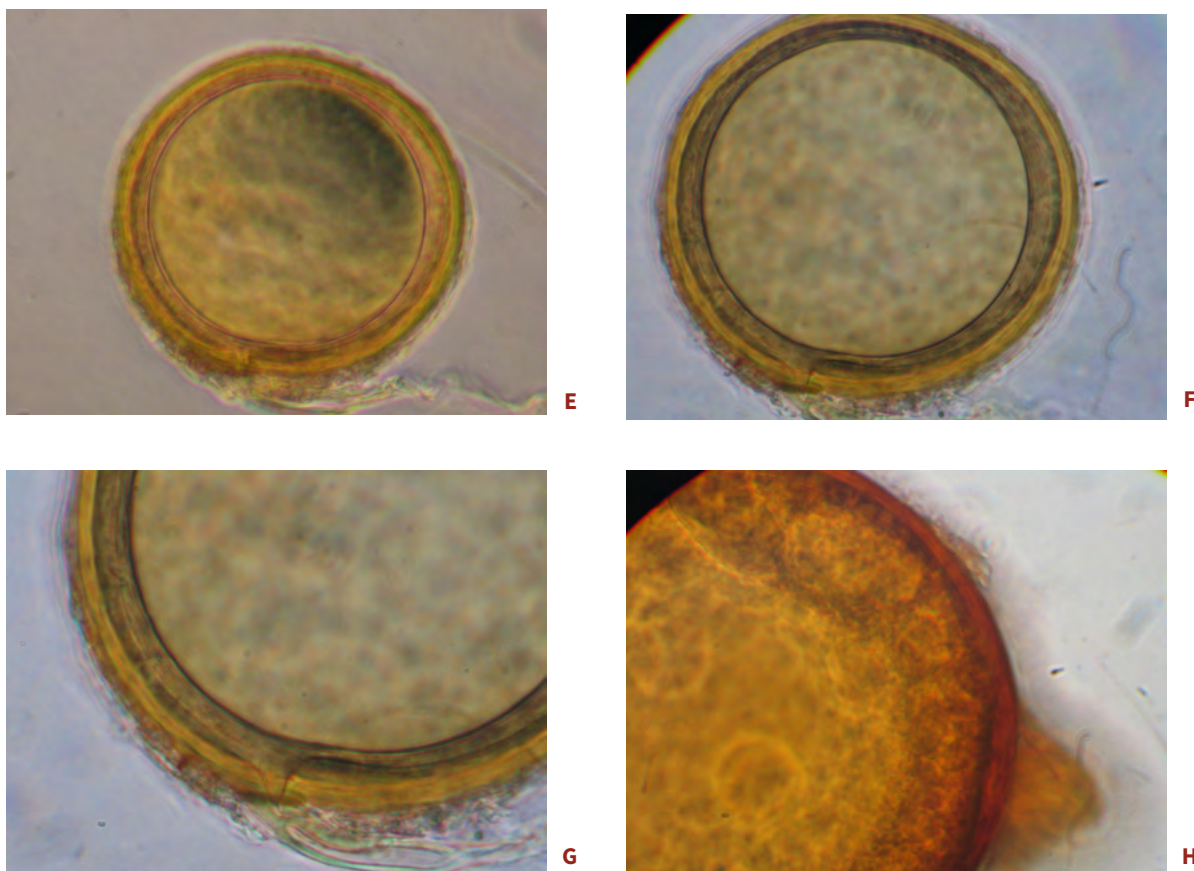


Figura 10. Esporas aisladas del municipio de Sandoná: a. *Septoglosum constrictum*; b. *Glomus macrocarpum*; c. *Diversispora* sp.; d. *Glomus brohultii*. Municipio de Linares: e, f y g. *Claroideoglosum* sp.; h. *Funneliformis* sp.

Fotos: Urley Adrián Pérez y María Margarita Ramírez

¿Qué aprendimos sobre la diversidad de HFMA en los suelos estudiados?

Aprendimos que si bien se comprobó que en los suelos de Nariño existen HFMA y que son capaces de establecer simbiosis en forma natural con plantas de caña para panela, el número de esporas y la diversidad de morfotipos no es tan alta como la que se encuentra en otras zonas paneleras del país. También aprendimos que hay grandes diferencias en número y diversidad de HFMA entre fincas y entre municipios, lo cual se puede deber al manejo que históricamente se le ha dado a cada uno de los lotes. En consecuencia, debido a la baja diversidad y número de esporas presentes en los suelos nariñenses es importante considerar el fortalecimiento de las comunidades de HFMA mediante la aplicación de biofertilizantes.



Foto: Banco de fotos Agrosavia



4. ¿Cuál es el efecto de la inoculación en vivero?

¿Qué pasa si inoculamos las plantas con HFMA en vivero?

Con el fin de conocer el efecto benéfico que tiene el uso de los HFMA, se realizaron experimentos en vivero para seleccionar las comunidades de HFMA que establecen simbiosis con plantas de caña y cuyo beneficio se refleja en el crecimiento y desarrollo de las plántulas que posteriormente van a ser trasplantadas a campo. Con este objetivo se hicieron tres ensayos, uno con cada variedad.

En este apartado se describen los materiales vegetales que se emplearon, el sustrato en el que se hicieron los ensayos, el procedimiento de inoculación y trasplante a vivero, el diseño experimental y los principales resultados.

¿Cómo se realizaron los ensayos?

Material vegetal

Las variedades de caña que se utilizaron fueron las últimas que entregó Agrosavia, las cuales se compararon con la variedad más utilizada en las zonas paneleras de Nariño. A continuación, se presentan las principales características de cada variedad:

Variedad CC 93-7711:

- ◆ Buena adaptabilidad a suelos de baja fertilidad.
- ◆ Alta capacidad de macollamiento.
- ◆ Alta eficiencia en el uso del agua.
- ◆ Material semi-tardío (madurez fisiológica antes de los 18 meses).
- ◆ Resistente a roya café (*Puccinia melanocephala*), carbón (*Sporisorium scitamineum*) y virus de la hoja amarilla (género *Polerovirus* y familia Luteoviridae).
- ◆ Tolerante a daños foliares y bajo índice de daño por *Diatraea* sp. (11 %).
- ◆ Producción de 270,6 toneladas de caña por hectárea (TCH) y 30,8 toneladas de panela por hectárea (TPH) (Ji, 2013; Viveros, 2011).

Variedad CC 93-7510:

- ◆ Buena adaptabilidad a suelos de baja fertilidad.
- ◆ Alta capacidad de macollamiento.
- ◆ Precocidad (según índice de madurez, IDM, antes de los 16,1 meses).

- ◆ Resistente a roya café (*Puccinia melanocephala*), carbón (*Sporisorium scitamineum*) y virus de la hoja amarilla (género *Polerovirus* y familia *Luteoviridae*) y hojas sanas fitosanitariamente.
- ◆ Bajo índice de daño por *Diatraea* sp. (4,35 %).
- ◆ Producción de 208,8 TCH y 26,5 TPH (Ramírez et al., 2014).

Sustrato

Para hacer los ensayos se utilizó suelo de la zona panelera de Nariño, que fue caracterizado químicamente utilizando los siguientes métodos para determinar:

- ◆ pH (potenciómetro: agua 1:1).
- ◆ Materia orgánica (Walkey & Black).
- ◆ Fósforo disponible (P) (Bray II).
- ◆ Azufre disponible (fosfato monobásico de calcio).
- ◆ Acidez intercambiable (Al+H) (Método KCl).
- ◆ Aluminio intercambiable (Al) (Método KCl).
- ◆ Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable (Acetato de amonio 1N pH 7,0).
- ◆ Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE) (suma de cationes).
- ◆ Conductividad eléctrica (conductímetro suelo: agua 1:2,5).

Específicamente, se realizó una mezcla de suelo con cascarilla de arroz y arena en proporción de 3:1:1. Además, la mezcla del sustrato fue desinfectada con ingrediente activo (methyl isothiocyanate) y solarizada por un período de 15 días. Posteriormente se realizaron volteos al sustrato para llenar materas de 1 kg.

Inoculación y trasplante en vivero

Las plántulas fueron inoculadas con HFMA locales procedentes de zonas productoras de caña panelera de los municipios de Sandoná, Ancuya y Linares, del departamento de Nariño. Para obtener los inóculos se realizó un proceso de multiplicación de las esporas de HFMA mediante la inoculación sucesiva en materas con lechuga y pastos, las cuales fueron dejadas en estrés hídrico durante un mes para aumentar el número de esporas.

Al final del proceso de multiplicación se realizó un control de calidad, de acuerdo con el cual el número de esporas ≥ 70 g suelo-1

(Ramírez, et al., 2020). Adicionalmente, se evaluaron dos cepas de referencia de HFMA: *Glomus* sp. y *Acaulospora mellea*, provenientes de la colección de trabajo de HFMA, las cuales fueron evaluadas previamente (2015-2016) en forma individual y en mezcla en diversas variedades de caña panelera (CC 93-714, CC 93-7510 y CC 91-1555).

Por último, la inoculación se realizó con 70 esporas g suelo seco-1 planta-1. Posteriormente, las plántulas fueron trasplantadas a materas de capacidad de 1 kg con la mezcla del sustrato anteriormente descrito (figura 11).



Figura 11. Proceso para establecer el ensayo de HFMA locales de Nariño. a y b. Aplicación de HFMA en materas de 1 kg; c. Plántulas de caña; d. Siembra de plántula de caña; e y f. Materas sembradas.

Fotos: Andrea María Peñaranda

Diseño experimental

Los ensayos de evaluación en vivero de los HFMA en las variedades CC 93-7510 y CC 93-7711 se hicieron con un diseño de Bloques Completos al Azar, con tres repeticiones y quince plantas como unidad experimental. Cada variedad se manejó como un ensayo independiente (figura 12) y se evaluaron ocho tratamientos:

- ◆ Cinco tratamientos fueron de inoculación con HFMA.
- ◆ Tres testigos de fertilización con el 10 %, 50 % y 100 % de fertilización química convencional (tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos evaluados en vivero

Tratamiento	HFMA	Fertilizacion Química (FQ)
T1	Morfotipo 1	50 %
T2	Morfotipo 2	50 %
T3	Morfotipo 3	50 %
T4	<i>Glomus</i> sp.	50 %
T5	<i>Acaulospora</i> sp.	50 %
T6	Testigo 10 %	10 %
T7	Testigo 50 %	50 %
T8	Testigo 100 %	100 %

Fuente: Elaboración propia

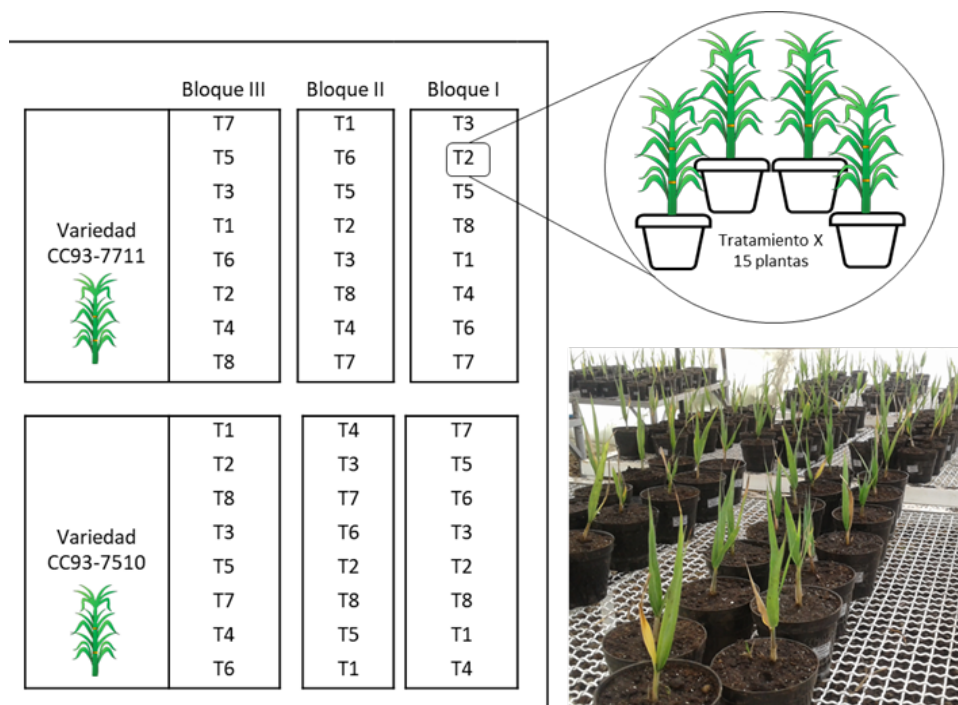


Figura 12. Distribución de tratamientos en vivero.

Fuente: Elaboración propia

Fertilización

Los testigos se fertilizaron de la siguiente manera: T6 (10 % FQ): 0,4 g de 10-30-10 planta-1, T7 (50 % de FQ): 2g de 10-30-10 planta-1 y el T8 (100 % FQ): 4g de 10-30-10 planta-1. Cabe destacar que los tratamientos de inoculación se fertilizaron con el 50 % de la fertilización química (2g de 10-30-10 planta-1).

Manejo y muestreos

Las plantas fueron regadas día por medio. Se realizó un muestreo destructivo, en el cual se desentierra la planta de la materia para poder hacer las lecturas a los cien días después de siembra (dds) y evaluar la altura de planta, el diámetro de tallo, el peso fresco y seco de la parte aérea y la raíz de la planta. Adicionalmente, se realizó un análisis simbiótico de los HFMA con el conteo de esporas y el porcentaje de colonización.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio, donde se determinó el número de esporas g suelo-1, empleando el método de Gendeman & Nicolson (1963) (figura 13) y se determinó el porcentaje de colonización de raíces mediante el método de Philips & Hayman (1970) (figura 14). Este indicador permite determinar si la simbiosis entre planta y hongo se estableció, por medio de la observación del hongo en el interior de las raíces.

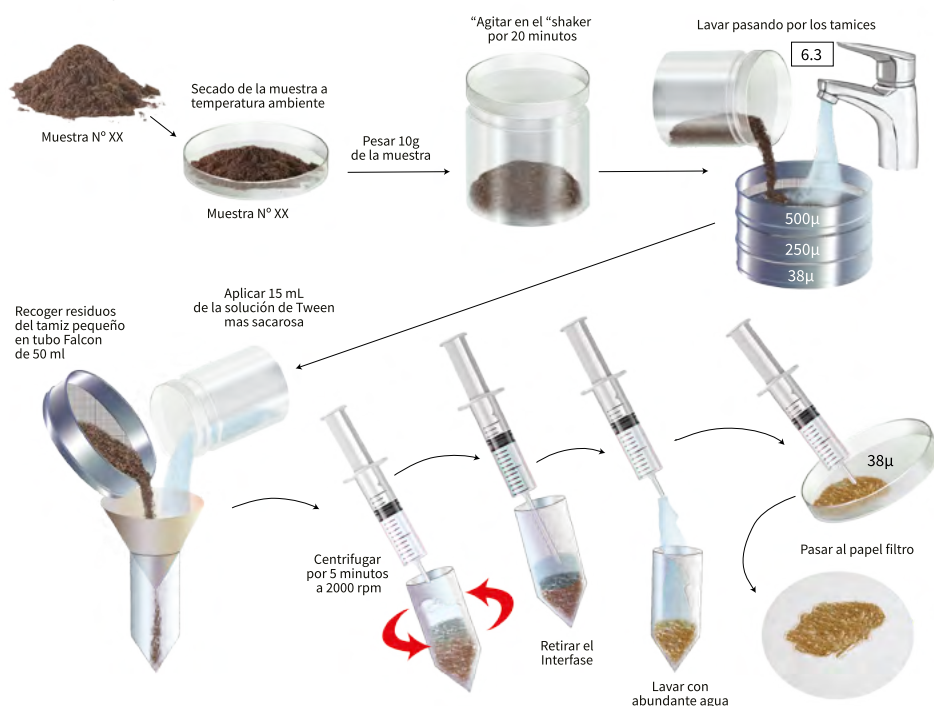


Figura 13. Conteo de esporas.

Fuente: Elaboración propia

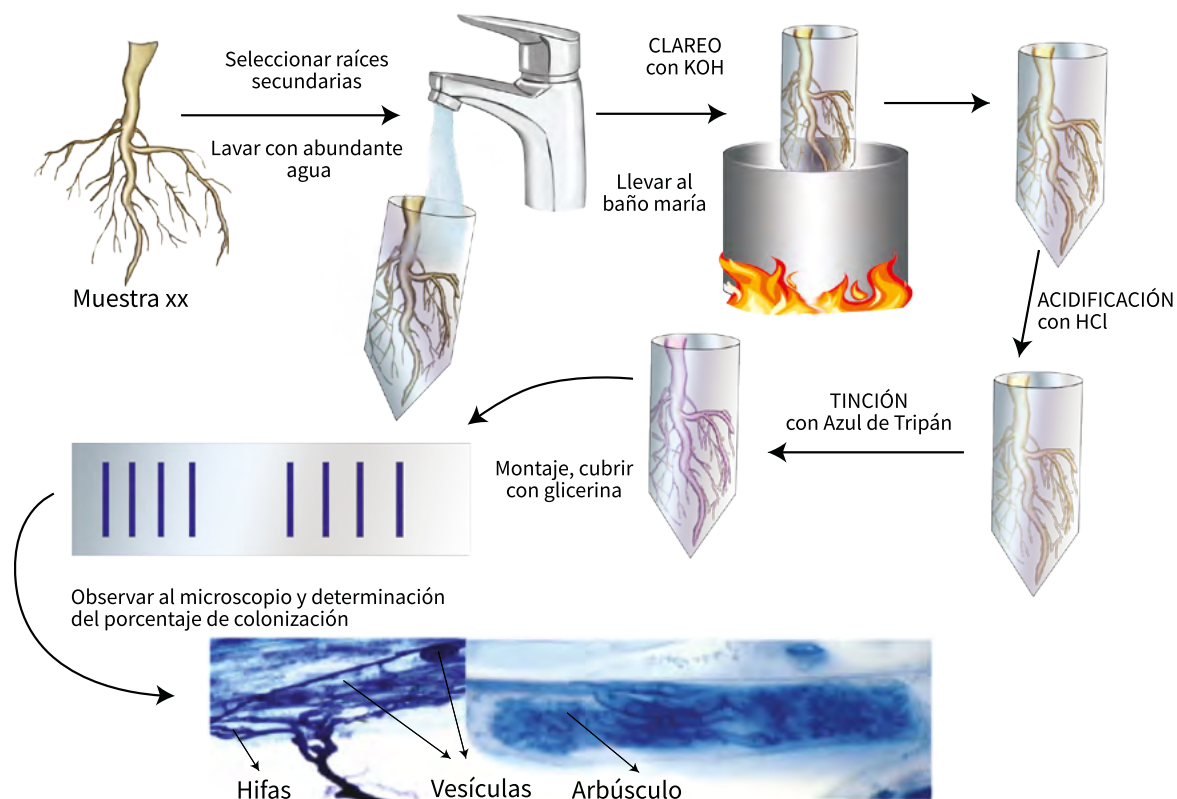


Figura 14. Tinción de raíces.

Fuente: Elaboración propia, con la colaboración de Urley Adrián Pérez

El análisis estadístico se realizó mediante Anova y prueba de comparación de medias de Tukey (5 %), lo cual permite determinar si hay diferencias entre los tratamientos (mayor altura, mayor peso, etc.) y con qué nivel de confianza es posible afirmar que este comportamiento se puede repetir en condiciones similares a las del experimento.

¿Qué resultados arrojan los ensayos?

Después de realizar los muestreos a los cien días de crecimiento de la planta y de medir las variables de su crecimiento, se realizaron los análisis para determinar cuál o cuáles de los tratamientos permitieron un mejor desarrollo de las plantas y verificar si el uso de los HFMA favorece este crecimiento o no.

Caracterización química del suelo

Se realizó la caracterización química del suelo empleado en el establecimiento de los ensayos de caña en vivero. Los resultados se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización química del sustrato empleado para establecer los ensayos de HFMA en Nariño

Determinación analítica	Valor	Descripción
pH	5,6	Moderadamente ácido
Conductividad eléctrica (dS m-1)	0,6	No salino
Materia orgánica (MO) (g 100g-1)	10,48	Bajo
Fósforo disponible (P) (mg kg-1)	20,28	Medio
Calcio (Ca) (cmol+ kg-1)	4,32	Medio
Magnesio (Mg) (cmol(+) kg-1)	1,74	Medio
Potasio (K) (cmol(+) kg-1)	1,17	Alto
Sodio (Na) (cmol(+) kg-1)	0,13	Normal
Capacidad de intercambio catiónico (CICE) (cmol(+) kg-1)	1,35	Bajo

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, el suelo utilizado tenía valores medios o bajos de la mayoría de los nutrientes, lo cual favorece la asociación de la planta con los HFMA. Partiendo de esta información y de los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar para panela, se realizó la aplicación del 50 % y del 100 % de la fertilización, dependiendo del tratamiento.

Variedad CC 93-7510

Se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables altura, diámetro del tallo y peso de la parte aérea de las plantas. El tratamiento inoculado con *Glomus* sp. fue el que obtuvo los mayores valores en todas las variables, lo cual coincide con otros estudios en caña de azúcar que reportan un mayor rendimiento de caña por hectárea en condiciones de campo cuando se inoculan las plantas con *Glomus* sp. (Ordóñez, 2015).

En la variable de peso seco de raíz, no se presentaron diferencias significativas, sin embargo, el tratamiento inoculado con *Glomus* sp. fue el que presentó el valor más alto en comparación con los demás tratamientos. La asociación de plantas de caña de azúcar para panela con HFMA presenta una notable mejoría en la nutrición de la planta (Datta & Kulkarni, 2012), por cuanto en todas las variables evaluadas se pudo observar el efecto positivo de los HFMA en la nutrición de esta variedad, con valores superiores o iguales en algunos casos a los testigos fertilizados con el 10 %, 50 % o 100 % sin inoculación (figura 15).

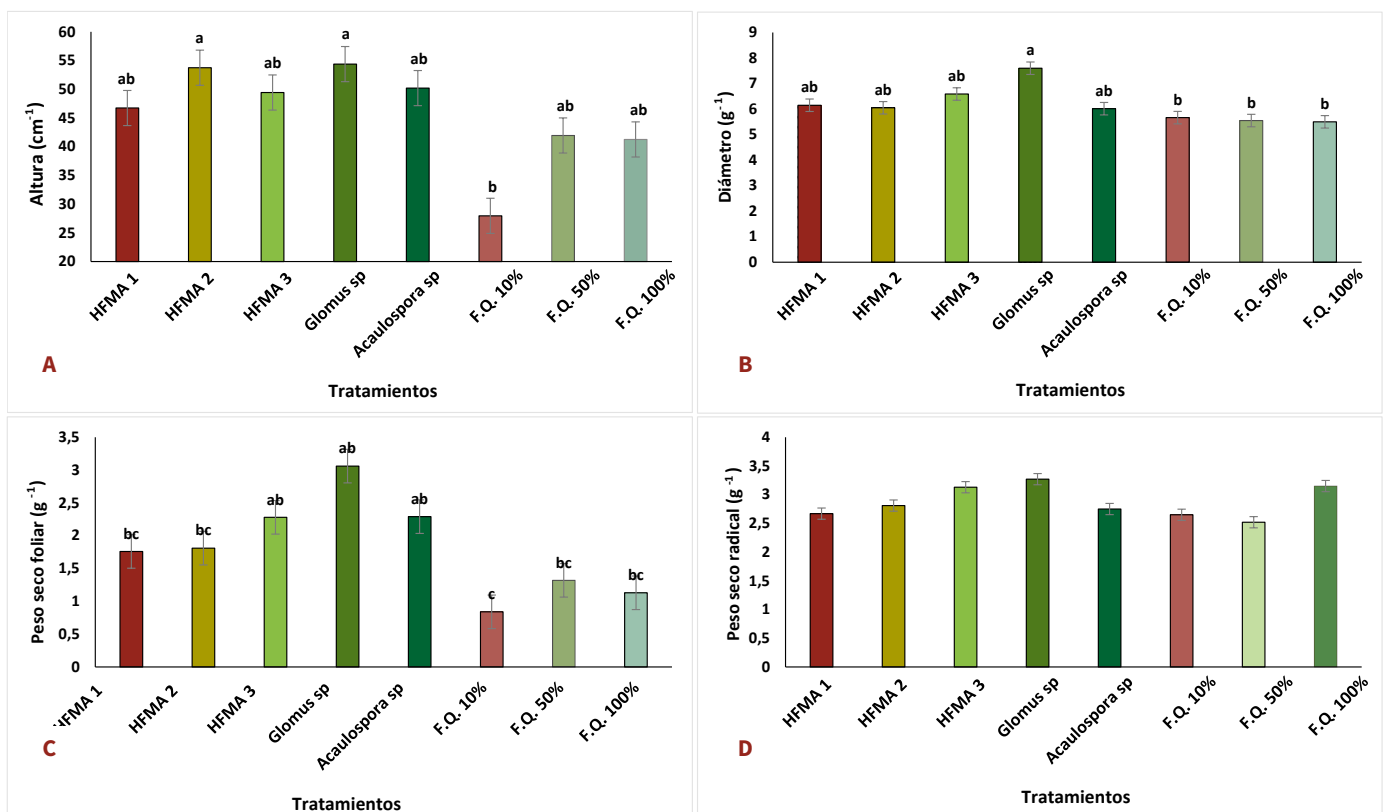


Figura 15. Respuesta agronómica de plantas de caña de azúcar para panela, variedad CC 93-7510, inoculadas con HFMA a los 100 ddt. a. Altura de planta (cm); b. Diámetro de tallo (cm); c. Peso seco foliar (g); d. Peso seco radical (g). HFMA1: Comunidad de Ancuya; HFMA2: Comunidad de Linares; HFMA3: Comunidad de Sandoná; FQ: Fertilización química. Letras diferentes muestran diferencias significativas ($P < 0,05$) de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey.

Fuente: Elaboración propia

Variedad CC 93-7711

Como se mencionó, la asociación de HFMA con plantas de caña de azúcar para panela mostró resultados positivos en aumento de la altura en la planta (Sulistiono et al., 2017). En esta variedad se presentaron diferencias estadísticamente significativas en altura de las plantas: el tratamiento inoculado con *Glomus* sp. y el fertilizado al 50 % fueron los que presentaron los mayores valores en comparación al testigo con el 100 % de fertilización química.

¿Qué se concluye?

El uso de HFMA sobre las variables agronómicas en la variedad CC 93-7510 es importante, ya que tienen efecto positivo en el desarrollo foliar de las plantas de caña en vivero. Todas las plantas inoculadas con HFMA fueron fertilizadas con tan solo 50 % de fertilización química convencional, lo cual se traduce en eficiencia en la optimización de la fertilización y, por consiguiente, en la reducción de costos de fertilización en vivero. Esto constituye una oferta atractiva para los productores de caña de azúcar para panela en la región, ya que de esta forma el material vegetal, en este caso las plántulas, va a campo más rápido que con los métodos convencionales de producción de plántulas. Además, la tecnología con el uso de HFMA es una oferta potencial para viveristas de plántulas de caña de azúcar para panela.

Los beneficios de la asociación micorrícica en nutrición vegetal han sido ampliamente reportados desde hace varios años, en especial se conoce que la absorción de fósforo, el nitrógeno, el potasio son favorecidos en simbiosis eficientes (Barea et al., 1991; Bi et al., 2003; Bolan, 1991; Hawkins et al., 2000; Roveda et al., 2009a, 2009b; Smith & Read, 2008), mientras que los mayores esfuerzos de la investigación se han centrado en prevenir los efectos tóxicos de los micronutrientes en las plantas (Bürkert & Robson, 1994; Cooper, 1984). Asimismo, se considera que la amplia variación de respuestas entre diferentes HFMA se debe a las diferencias funcionales entre los distintos HFMA, como reportan Dighton et al. (1990), especialmente relacionada con la capacidad diferencial de HFMA en toma y transporte de P, asociada a las estrategias de

crecimiento de micelio entre distintos géneros y especies de HFMA (Bonfante & Genre, 2008; Smith & Read, 2008).

El papel de los HFMA en los ecosistemas es de gran importancia debido a que, mediante la simbiosis, las plantas pueden obtener nutrientes minerales del suelo, mejorar su tolerancia a estreses bióticos y abióticos (Smith & Read, 2008). Diferencias en el crecimiento de hifas y estrategias de toma de fósforo observadas entre especies de HFMA pueden tener un papel importante e incluso significarían que una amplia diversidad de HFMA puede estar relacionada con un incremento en la eficiencia de extracción de nutrientes y, por lo tanto, en los beneficios al hospedero. Así mismo, explicarían la presencia de diversos HFMA en suelos y en raíces. Los beneficios de la simbiosis en el hospedero se observan en supervivencia, productividad (cantidad y calidad), morfología de planta y capacidad reproductiva (Goverde et al., 2000). La simbiosis de hongos micorrícicos arbusculares y plantas de caña en etapa de vivero promovió mejores resultados en el desarrollo agronómico de las variedades estudiadas.

¿Cuáles fueron los beneficios del uso de HFMA en vivero?

En vivero se logró reducir la cantidad de fertilizantes en 50 %, ya que las plantas con micorrizas tuvieron un crecimiento similar o superior al que se logró con el 100 % de la fertilización química. Las mejores respuestas se lograron en altura de planta y peso seco de planta, lo cual evidencia una mayor acumulación de biomasa de la planta con el uso de HFMA. Con el empleo de *Glomus* spp. las variables de altura, diámetro, peso seco aéreo y de raíz mostraron los mayores valores, igualando o superando al testigo con 100 % de fertilización química. Recordemos que los tratamientos con HFMA solamente tenían el 50 % de la fertilización química.





5. ¿Cómo se comportaron los HFMA en campo?

¿Podemos mejorar la producción de caña con el uso de HFMA?

Las evaluaciones en campo se realizaron para comprobar los beneficios de los HFMA en las condiciones de suelo, ambiente y prácticas agronómicas con que trabajan los productores de caña, pues esto permite hacer recomendaciones con una alta seguridad de que se va a obtener el beneficio esperado.

Específicamente, en esta etapa final del proyecto se evaluaron los HFMA en dos zonas productoras de caña panelera del departamento de Nariño, con los mismos tratamientos y materiales vegetales que se describieron en el apartado anterior. No obstante, cabe señalar que las diferencias de los dos lotes radican en que son zonas agroecológicas diferentes (seca y húmeda; pendiente y plano) y por su altura sobre el nivel del mar. En esta cartilla solamente se presentan los resultados del trabajo en Ancuya, para lo cual primero se hace una contextualización del territorio, se describe el procedimiento metodológico y se sintetizan los principales resultados.

¿Cuáles son las características de los predios elegidos?

Finca El Limonal, en Ancuya

La finca seleccionada en Ancuya fue El Limonal, localizada en la vereda El Limonal y propiedad del productor Arvey Alexander David Castro. Tiene una altitud de 1.100 m.s.n.m. en un lote con alta pendiente (40 %), con precipitación promedio anual de 1.600 mm y temperatura promedio de 25 °C. (figura 16).

Finca Villa Rosa, en Consacá

La finca seleccionada en Consacá fue Villa Rosa, localizada en la vereda El Guavo y propiedad del productor Rafael Román Martínez, con una altitud de 1.200 m.s.n.m., en un lote con topografía ondulada (20 %), con precipitación promedio anual de 1.318 mm y temperatura promedio de 20 °C.

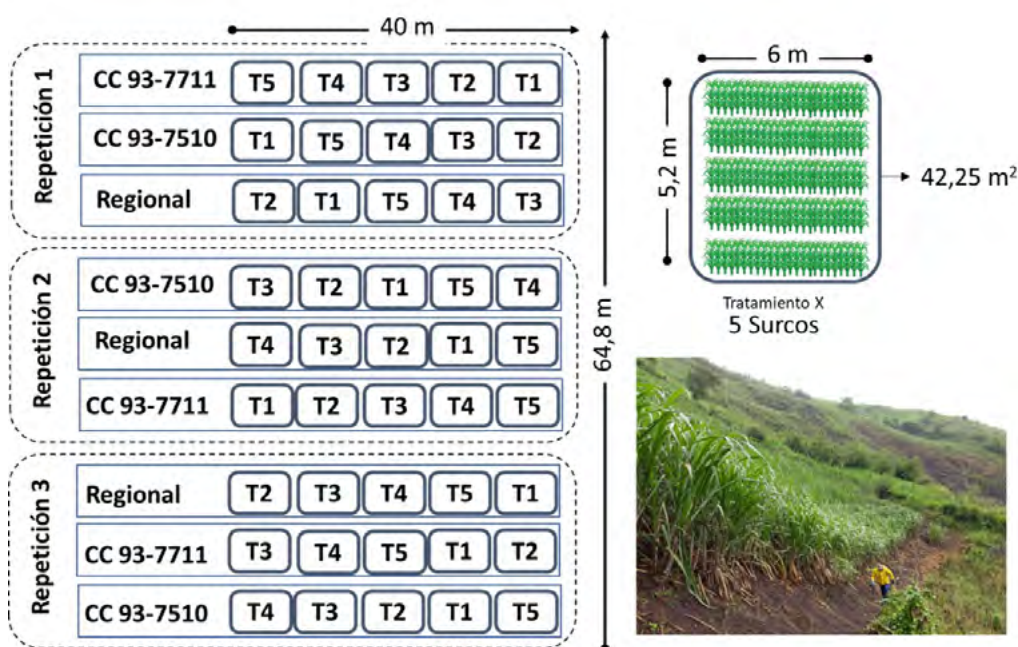


Figura 16. Esquema del ensayo realizado en la localidad de Ancuya.

Fuente: Elaboración propia.

¿Cómo se realizaron los ensayos?

Material vegetal

Las plántulas de caña de las variedades CC 93-7711 (V1) y CC 93-7510 (V2) fueron adquiridas de Cenicaña. Las plántulas del testigo regional (V3) se obtuvieron a partir de yemas de cangres de la zona, las cuales fueron sembradas en bolsas de vivero para que germinaran.

Diseño experimental

En las dos localidades se evaluaron tres variedades, cada una de ellas de manera independiente. Se empleó un diseño experimental de Bloques Completos al Azar (BCA) con cinco tratamientos de fertilización en 45 parcelas experimentales/localidad:

- ◆ Tres tratamientos de inoculación con HFMA.
- ◆ Dos testigos de fertilización química (FQ) del 50 % y 100 %, con tres repeticiones (tabla 3).

Tabla 3. Tratamientos de biofertilización y testigos evaluados en Ancuya y Consacá, para tres variedades de caña para panela (CC 93-7510, CC 93-7711 y regional)

Tratamiento	HFMA	Fertilización química
T1	Comunidad Nativa HFMA1	50 %
T2	Comunidad Nativa HFMA2	50 %
T3	HFMA referencia. <i>Glomus</i> sp + <i>Acaulospora</i> sp	50 %
T4	Testigo Sin HFMA	50 %
T5	Testigo Sin HFMA	100 %

Fuente: Elaboración propia

¿Qué resultados arrojan los ensayos en Ancuya?

A continuación, se presentan los resultados del ensayo con gráficas para las variables agronómicas analizadas en tres variedades de caña CC 93-7711, CC 93-7510 y regional en la localidad de Ancuya. Cabe destacar que cada variedad se analizó como ensayos independientes, ya que cada una tiene condiciones agronómicas y requerimientos nutricionales diferentes. El muestreo consistió en tomar todo el material existente en 1 metro lineal, en cada localidad (total 45 parcelas), al azar, para evaluar las siguientes variables de respuesta agronómica: altura de la planta (m) hasta la primera lígula visible, diámetro de tallos (cm), población de tallos (PT), número de hojas verdes, pesos frescos y secos (g- kg) por órgano (hojas, yaguas, cogollos y tallos). La cosecha se realizó a los 18 meses de edad del cultivo.

Específicamente, la variable altura de planta en la variedad CC 93-7711 con inoculación de comunidades nativas HFMA 1 y 2 presentó las menores alturas de plantas, y se observó un ligero incremento en altura con la mezcla de *Glomus* sp. y *Acaulospora* sp. en relación con el testigo con 50 % de fertilización química (FQ). En la variedad CC 93-7510 se observaron incrementos del 12 % en el tratamiento con inoculación con comunidades nativas HFMA 1, en comparación con los demás tratamientos, superando a los dos testigos evaluados sin inoculación con HFMA. En cuanto a la variedad regional, la inoculación con las comunidades nativas HFMA1 y HFMA 2 produjo incrementos de 7 % y 13 % en altura de plantas con respecto al tratamiento con 50 % de FQ (figura 17).

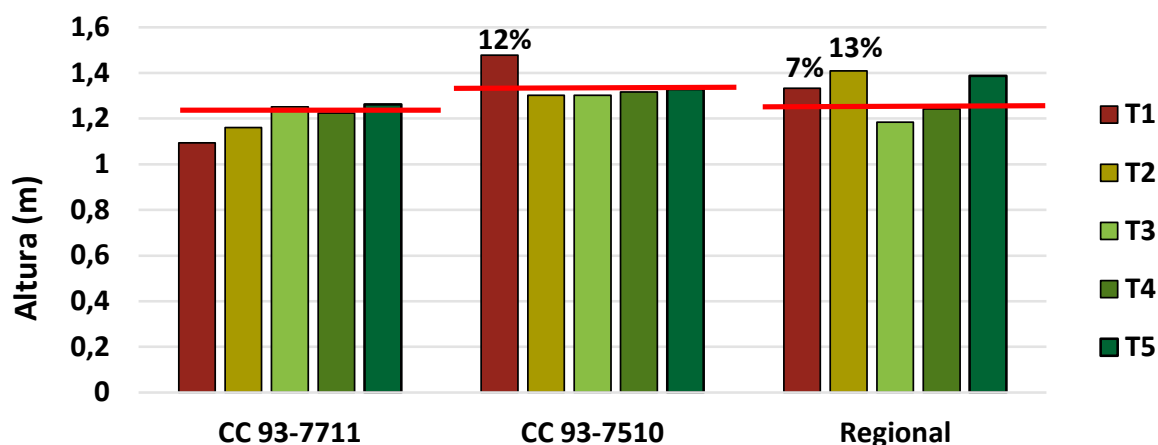


Figura 17. Respuesta de tres variedades de caña de azúcar para panela a la biofertilización con HFMA y la fertilización química en la localidad de Ancuya. Altura de planta (m). T1: HFMA 1 + 50% FQ; T2 HFMA 2 + 50% FQ; T3 Mezcla *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp. + 50% FQ; T4: 50% FQ; T5; 100% FQ.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al diámetro de tallo, para la variedad CC93-7711 se observaron incrementos del 8,3% y 9% con la inoculación con HFMA1, HFMA2 y mezcla de *Glomus* sp. y *Acaulospora* sp., respectivamente, en relación con el testigo con aplicación de 50% de FQ, superando en el caso de los tratamientos HFMA1 y mezcla de *Glomus* sp. y *Acaulospora* sp. al testigo con 100% FQ. Para la variedad CC 93-7510 solamente se observaron incrementos del 3% en el diámetro de tallo cuando se aplicaron los HFMA, en relación con el testigo con 50% FQ. En el caso de la variedad regional, ninguno de los tratamientos con HFMA, nativos o de referencia generó incremento en el diámetro de tallo (figura 18).

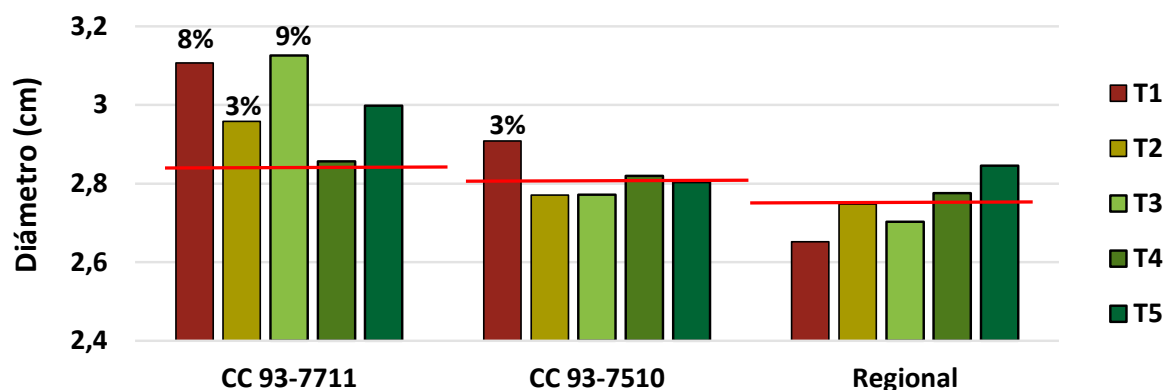


Figura 18. Respuesta de tres variedades de caña de azúcar para panela a la biofertilización con HFMA y la fertilización química en la localidad de Ancuya. Diámetro de tallo (cm). T1: HFMA 1 + 50% FQ; T2 HFMA 2 + 50% FQ; T3 Mezcla *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp. + 50% FQ; T4: 50% FQ; T5; 100% FQ.

Fuente: Elaboración propia.

Para la producción en términos de toneladas de caña por hectárea (TCH), en la variedad CC 93-7711 se observaron incrementos del 8 % cuando se aplicó la mezcla de *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp., superando a los testigos con aplicación de FQ (50 % y 100 %). En contraste, con las comunidades nativas se obtuvieron las menores producciones. En el caso de la variedad CC93-7510, se lograron incrementos en TCH del 6 % y el 11 % con el uso de las comunidades nativas HFMA1 y HFMA2, respectivamente. Finalmente, para la variedad regional se obtuvo un importante incremento en producción, del 38 %, con el uso de HFMA1 (figura 19).

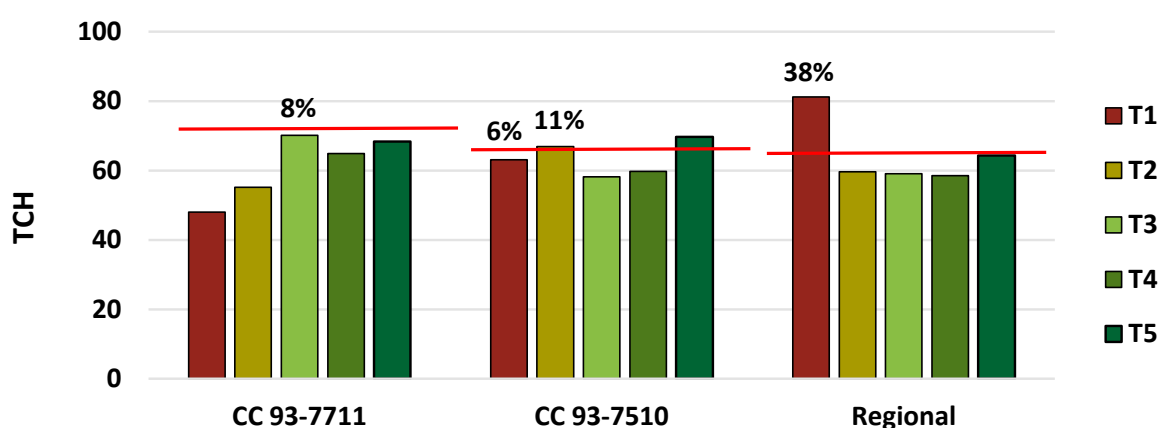


Figura 19. Respuesta de tres variedades de caña de azúcar para panela a la biofertilización con HFMA y la fertilización química (FQ) en la localidad de Ancuya. Producción TCH. T1: HFMA 1 + 50% FQ; T2 HFMA 2 + 50 % FQ; T3 Mezcla *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp. + 50 % FQ; T4: 50 % FQ; T5; 100 % FQ.

Fuente: Elaboración propia.

¿Qué se concluye?

Los resultados, tanto en las variables agronómicas como en las de producción, muestran que los beneficios dependen de la variedad y del tipo de HFMA con la cual se trabaja: para la variedad CC 93-7711, los mejores resultados se encontraron al aplicar la mezcla de *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp., mientras que para la variedad CC 93-7510 y la variedad regional, los mejores resultados se observaron al inocular las plantas con las comunidades nativas HFMA1.

¿Qué aprendimos de los ensayos de campo?

En Ancuya las plantas de caña de tres variedades mostraron respuestas diferentes a su inoculación con HFMA. Se observaron incrementos en altura de planta de entre 7 % y 13 % para las variedades CC 7510 y regional, pero no se encontraron diferencias en la variedad CC 7711 frente al uso de HFMA. En diámetro de tallo las diferencias estuvieron entre 3 % y 9 % para las variedades CC 7510 y CC 7711, respectivamente, pero no en la variedad regional. Sin embargo, las diferencias más importantes se presentaron en la cantidad de toneladas de caña por hectárea (TCH): la variedad CC 7711 tuvo un incremento en producción del 8 % cuando se aplicó la mezcla de *Glomus* sp. + *Acaulospora* sp.; en la variedad CC 7510 se evidenciaron aumentos de 6 % y 11 % cuando se aplicaron las comunidades nativas HFMA1 y HFM2 provenientes de Ancuya y Sandoná, respectivamente, con una mejoría del 38 % en producción en la variedad regional cuando se inoculó con la comunidad nativa HFMA1 proveniente de Ancuya.





6. ¿Cuáles son las ventajas económicas de usar HFMA?

¿Podemos reducir los costos de fertilización de caña de azúcar para panela con el uso de HFMA?

Como ejercicio final de la investigación y con el fin de conocer los beneficios económicos de la biofertilización con HFMA en cultivos de caña de azúcar para panela en el departamento de Nariño, se realizó un seguimiento de los costos de establecimiento y mantenimiento del cultivo. En la tabla 4 se detallan los costos que se incluyeron para el ciclo de cultivo, los cuales se convirtieron posteriormente a costos por hectárea:

- ◆ Mano de obra: jornales empleados en preparación de lote, siembra, inoculación de HFMA, fertilización, control de malezas, riego, deshoje, muestreos y cosecha.
- ◆ Insumos: preparación de suelo con guadaña o yunta, semillas, enmiendas, fertilizantes, micorriza (HFMA) y herbicidas.
- ◆ Tecnología utilizada, teniendo en cuenta los costos directos e indirectos.
- ◆ Área empleada (2.592 m²).

Tabla 4. Costos de producción para los tratamientos con fertilización química del 50 %, 100 % y 50 % + HFMA

Actividades	100 % FQ	50 % FQ	HFMA + 50 % FQ
	Valor total \$.ha-1		
	Costos directos		
Preparación suelo	770.000	770.000	770.000
Mano de obra	8.910.032	8.910.032	9.000.175
Semilla	8.136.504	8.136.504	8.136.504
Fertilizantes	2.092.228	1.046.354	1.046.354
HFMA	0	0	370.370
Herramientas y equipos	435.000	435.000	435.000
Subtotal Costos directos	20.343.764	19.297.890	19.758.403
	Costos indirectos		
Arriendo	1.950.000	1.950.000	1.950.000
Costo total	22.293.764	21.247.890	21.708.403

Fuente: Elaboración propia.

Para el tratamiento testigo con el 100 % de FQ los costos totales de establecimiento y mantenimiento fueron de \$ 22.293.764; para el tratamiento testigo con el 50 % de fertilización química, el costo total fue de \$ 21.247.889 y para los tratamientos de inoculación con HFMA (T1-T3), los costos totales del cultivo fueron de \$ 21.708.403 (tabla 5).

Tabla 5. Costos por tonelada de caña producida

	Tratamiento	CC 93-7711	CC 93-7510	Regional
T1	Aislamiento HFMA 1	\$ 425.325	\$ 343.948	\$ 267.406
T2	Aislamiento HFMA 2	\$ 393.211	\$ 324.416	\$ 364.250
T3	HFMA referente (<i>Glomus</i> sp. + <i>Acaulospora</i> sp.)	\$ 309.747	\$ 373.505	\$ 367.283
T4	Testigo 50 %	\$ 327.602	\$ 355.391	\$ 363.242
T5	Testigo 100 %	\$ 326.092	\$ 319.807	\$ 346.687

Fuente: Elaboración propia

En cada tratamiento se realizó una distribución porcentual de los costos del cultivo, en este caso, de los costos de establecimiento y mantenimiento. Para el caso del tratamiento testigo 100 % FQ, los insumos corresponden a 60 % de insumos y 40 % a mano de obra; en el caso del tratamiento testigo 50 % FQ, los insumos equivalen al 58,1 % y 41,9 % a mano de obra, y para los tratamientos de inoculación con HFMA, los insumos representan el 58,5 % y 41,5 % a mano de obra.

En la tabla 5 se observan los costos t-1 de caña producida para cada tratamiento de fertilización. Para la variedad CC 93-7711, hay que destacar el costo del tratamiento de inoculación T3, ya que el valor fue inferior en \$ 17.854 en relación con el testigo 50 % y su rendimiento fue superior en 5,2 t ha⁻¹ de caña.

Para la variedad CC 93-7510, cabe destacar el tratamiento de inoculación T2, ya que el valor es inferior en \$ 30.974 comparado con el testigo 50 % y su rendimiento fue superior en 7,1 t ha⁻¹ de caña. Lo anterior sugiere que para esta variedad CC 93-7510, el tratamiento de inoculación T2 es potencial para los productores de caña panelera, ya que el análisis económico comprueba que es viable en costos y ambientalmente, gracias a la incorporación de la fertilización biológica con HFMA (tabla 5).

Para la variedad regional se puede concluir que el tratamiento más rentable es el inoculado con T1, ya que el costo para producir una tonelada fue inferior en \$ 95.836 en relación con el T50 % y además el costo con T1 fue inferior en \$ 79.281 en relación con el testigo 100 %.

¿Logramos reducir costos de fertilización con el uso de HFMA?

Sí, efectivamente para todas las variedades, no solo se logró aumentar el rendimiento en TCH, sino que, además, al sustituir el 50 % de la fertilización química se logra una importante reducción de costos de \$ 18.000, \$ 31.000 y \$ 96.000 peso t⁻¹, para las variedades CC 93-7711, CC93-7510 y regional, respectivamente, lo cual significa una reducción de \$ 1.260.000 ha⁻¹, \$ 2.015.000 ha⁻¹ y \$ 8.019.000 ha⁻¹ para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y regional, respectivamente.

Adicionalmente, al reducir el uso de fertilizantes de síntesis química se protegen los ecosistemas, especialmente los suelos y el agua de la contaminación con los residuos de fertilizantes que no alcanzan a tomar las plantas.



Foto: Banco de fotos Agrosavia





Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones de la investigación:

1. Se encontró una alta diversidad de HFMA en suelos sembrados con caña de azúcar para panela en los municipios muestreados de Nariño.
2. Se evidenció una alta capacidad de establecimiento de simbiosis entre plantas de caña de azúcar para panela y los HFMA.
3. La asociación de plantas de caña de azúcar para panela con HFMA genera impactos positivos económicos y ambientales en el sistema productivo.
4. Se encontraron incrementos en producción (TCH) de entre el 6 % y el 38 %, que dependen de la variedad y de la comunidad de HFMA con que se inocule el cultivo.
5. La reducción en costos de producción por la sustitución del 50 % de la fertilización química fue de \$ 18.000, \$ 31.000 y \$ 96.000 peso t-1, para las variedades CC 93-7711, CC93-7510 y regional, respectivamente, lo cual significa una reducción de \$ 1'260.000 ha-1, \$ 2'015.000 ha-1 y \$ 8'019.000 ha-1 para las variedades CC 93-7711, CC93-7510 y regional, respectivamente.
6. La sustitución de 50 % de fertilización química reduce los riesgos de contaminación de suelos y aguas con excedentes de fertilizantes no utilizados por el cultivo, así como la producción de gases efecto invernadero como el óxido nitroso.
7. La inocuidad de la panela se mejora al emplear una menor cantidad de fertilizantes de síntesis química.



Foto: Banco de fotos Agrosavia

Referencias

- Agronet. (2019). Sistema de Estadísticas Agropecuarias [base de datos]. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx>
- Agronet. (2021). Sistema de Estadísticas Agropecuarias [base de datos]. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx>
- Barea, J. M., El-Atrach, F., & Azcón, R. (1991). The role of VA mycorrhizas in improving plant N acquisition from soil as assessed with ^{15}N . En C. Flitton (Ed.), *The use of stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies* (pp. 677-808). Joint IAEA-FAO Division.
- Bi, Y. L., Li, X. L., Christie, P., Hu, Z. Q., & Wong, M. H. (2003). Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash. *Chemosphere*, 50(16), 863-869. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00231-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00231-X)
- Bolan, N. S. (1991). A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plant. *Plant Soil*, 134(2), 189-207. <http://www.jstor.org/stable/42937062>
- Bonfante, P., & Genre, A. (2008). Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: An evolutionary-developmental perspective. *Trends in Plant Science*, 13(9), 492-498. <https://10.1016/j.tplants.2008.07.001>
- Boorboori, M. R., & Zhang, H.-Y. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi are an influential factor in improving the phytoremediation of arsenic, cadmium, lead, and chromium. *J. Fungi*, 8(2), 176. <https://doi.org/10.3390/jof8020176>
- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4), 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Bürkert, B., & Robson, A. (1994). ^{65}Zn uptake in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) by three vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in a root free sandy soil. *Soil Biol. Biochem*, 26(9), 1117-1124. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90133-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90133-3)
- Cooper, K. M. (1984). Physiology of VA mycorrhizal associations. En C. L. Powell & D. G. Bagyaraj (Eds.), *VA mycorrhiza* (pp. 155-188). CRC Press.

- Datta, P., & Kulkarni, M. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in sugarcane rhizosphere in relation with soil properties. *Not. Sci. Biol.*, 4(1), 66-74. <https://doi.org/10.15835/nsb416567>
- Diederichs, C. Y., & Moawad, A. M. (1993). The potential of VA mycorrhizae for plant nutrition in the tropics. *Angew. Bot.*, 67(3-4), 91-96.
- Dighton, J., Mason, P. A., & Poskitt, J. M. (1990). Field use of ³²P to measure phosphate uptake by birch mycorrhizas. *New Phytol.*, 116, 655-661. <https://www.jstor.org/stable/2557156>
- Ferrol, N., Tamayo, E., & Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: From mechanisms to biotechnological applications. *Journal of Experimental Botany*, 67(22), 6253-6265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>
- Gandia, A. (2013). *Decoding the mycorrhizal symbiosis: Why plants like fungi so much*. Fungicultura. <https://fungicultura.wordpress.com/2013/01/08/decoding-the-mycorrhizal-symbiosis-why-plants-like-fungi-so-much/>
- Gendermann, J., & Nicolson, T. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species, extracted from soil by wet-sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Gianinazzi-Pearson, V., & Gianinazzi, S. (1983). The physiology of vesicular arbuscular mycorrhizal roots. *Plant and Soil*, 71, 197-209. <https://doi.org/10.1007/BF02182655>
- Godbold, D. L., & Sharrock, L. (2003). Mycorrhizas. En G. Schroth & F. L. Sinclair (Eds.), *Trees, crops and soil fertility: Concepts and Research Methods* (pp. 271-287). CABI Publishing.
- Goverde, M., Van der Heijden, M. G. A., Wiemken, A., Sanders, I. R., & Erhardt, A. (2000). Arbuscular mycorrhizal fungi influence life history traits of a lepidopteran herbivore. *Oecologia*, 125, 362-369. <http://www.jstor.org/stable/4222783>
- Hawkins, H. J., Johansen, A., & George, E. (2000). Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 226, 275-285. <https://doi.org/10.1023/A:1026500810385>
- Jacobsen, I. (1995). Transport of phosphorus and carbon in VA mycorrhizas. En A. Varma & B. Hock (Eds.), *Mycorrhiza* (pp. 297-324). Springer-Verlag.
- Janos, D. P. (1980). Mycorrhizae influence tropical succession. *Tropical Succession*, 56-95 (Supplement: Tropical Succession).
- Ji, V. K. (2013). *Catálogo de variedades de caña de azúcar* (3.a ed.). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_31/st_31.pdf
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2021). *Cadena agroindustrial de la panela*. Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVAS). <https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

- Ordóñez, J. (2015). *Efecto de inóculos de hongos micorrízicos arbusculares sobre la nutrición fosfatada y rendimiento de caña de azúcar*; ingenio Pantaleón [Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar]. Repositorio Institucional. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/17/Ordonez-Jarhii.pdf>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Ramírez, J., Insuasty, O., & Murcia, M. L. (2014). *Variedades de caña de azúcar empleadas para la agroindustria panelera de Colombia*. Corpoica.
- Ramírez, M. M. (2014). *Evaluación de la diversidad de hongos formadores de micorizas arbusculares (HFMA) y su relación con el establecimiento de simbiosis con 'Physalis peruviana' L.* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47260>
- Ramírez, M. M., & Rodríguez, A. (2012). Mecanismos de defensa y respuestas de las plantas en la interacción micorrízica: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 271-284. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12621>
- Ramírez, M. M., Peñaranda, A. M., Serralde, D. P., & Pérez, U. D. (2020). *Producción y aplicación de hongos formadores de micorizas en vivero de caña para panela: Manual práctico de uso*. Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403732>
- Ramírez, M. M., Pérez, U., Serralde, D. P., Peñaranda, A., Roveda, G., & Rodríguez, A. (2019). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi communities associated with cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) crops. *Agronomía Colombiana*, 37(3), 239-254. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.74008>
- Ramírez, M. M., Roveda, G., Bonilla, R., Cabra, L., Peñaranda, A., López, M., Serralde, D. P., Tamayo, A., Navas, G., & Díaz, C. (2008a). *Uso de microorganismos con potencial biofertilizante en el cultivo de la uchuva*. Produmedios.
- Ramírez, M. M., Roveda, G., Bonilla, R., Cabra, L., Peñaranda, A., López, M., Serralde, D. P., Tamayo, A., Navas, G., & Díaz, C. (2008b). *Uso y manejo de biofertilizantes en el cultivo de mora*. Produmedios.
- Ramírez, M. M., Serralde, D. P., Roveda, G., Rosero, A. A., Rivero, S. T., Baquero, C. E., Martínez, J. C., Gutiérrez, B., Zuluaga, J. J., Pérez, D., Rodríguez, M., & Corredor, G. A. (2011). *Manual de uso y aplicación de hongos formadores de micorizas arbusculares en especies forestales*. Corpoica; Produmedios.
- Richardson, A. E., George, T. S., Hens, M., & Simpson, R. J. (2003). Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. En B. L. Turner, E. Frossard, & D. S. Baldwin (Eds.), *Organic phosphorus in the environment* (pp. 165-184). CABI Publishing.

- Roveda, G., Peñaranda, A., & Ramírez, M. (2004). Efecto de la doble inoculación con *Rhizobium* y micorrizas arbusculares en arveja (*Pisum sativum* var. arvense). En *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano y XII Colombiano de la Ciencia del Suelo. Suelo Ambiente y Seguridad Alimentaria*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Roveda, G., Ramírez, M., & Peñaranda, A. (2009b). *The effect of symbiotic association between arbuscular mycorrhizal fungi and 'Physalis peruviana' in crop nutrition*. Abstracts ICOM 6. 6th International Conference on Mycorrhiza. "Beyond the Roots". Belo Horizonte, Brasil.
- Roveda, G., Ramírez, M., Peñaranda, A., & Cabra, L., (2009a). Biofertilización en el cultivo de la mora (*Rubus glaucus* Benth.). En L. S. Barrero (Ed.), *Caracterización, evaluación y producción de material limpio de mora con alto valor agregado* (pp. 43-56). Produmedios.
- Sanders, I., & Croll, D. (2010). Arbuscular mycorrhiza: The challenge to understand the genetics of the fungal partner. *Annual Review of Genetics*, 44(1), 271-292. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-102108-134239>
- Sieverding, E. (1986). El papel de las micorrizas en la agricultura. *Suelos Ecuatoriales*, 16, 52-58.
- Sieverding, E. (1991). *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystem*. GTZ.
- Simard, S., & Durall, D. (2004). Mycorrhizal networks: a review of their extent, function and importance. *Can. J. Bot.*, 82, 1140-1165. <https://doi.org/10.1139/b04-116>
- Smith, S., & Gianinazzi-Pearson, V. (1998). Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhiza plant. *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, 39, 221-244. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.39.060188.001253>
- Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3.th ed.). Academic Press.
- Sulistiono, W., Taryono, T., Yudono, P., & Irham, I. (2017). Early-arbuscular mycorrhizal fungi-application improved physiological performances of sugarcane seedling and further growth in the dry land. *J. Agric. Sci.*, 9, 95-108. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n4p95>
- Valdez, C. G., Guzmán, M. A., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., & Rocha, A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Rev. Biol. Trop.*, 66(4), 1674-1682. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32135>
- Varma, A., & Hock, B. (1995). *Mycorrhiza: Structure, function, molecular biology and biotechnology*. Springer-Verlag.
- Viveros, C. A. (2011). Identificación de características asociadas con la mejor eficiencia en el uso de agua para la producción de caña de azúcar [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9049>



Foto: Banco de fotos Agrosavia





Las autoras

Andrea María Peñaranda Rolón

apenaranda@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0003-1231-646X>

Ingeniera de Producción Biotecnológica de la Universidad Francisco de Paula Santander y magíster en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Cuenta con una amplia experiencia en el estudio de hongos formadores de micorrizas y rizobios, y en su potencial como biofertilizante en invernadero, vivero y campo. Ha participado en la formulación y ejecución de varios proyectos de investigación en especies frutícolas, leguminosas, forestales y transitorias como la caña para producción de panela. Su experiencia profesional está enfocada en la evaluación de microorganismos con potencial biofertilizante y su impacto económico y ambiental en diversos cultivos. Actualmente se desempeña como Investigadora Máster del Centro de Investigación Tibaitatá de Agrosavia.

María Margarita Ramírez Gómez

mmramirez@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-7407-7321>

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia, MPhil en Microbiología de Suelos de la University of Wales, Reino Unido, y doctora en Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene amplia experiencia en el estudio de la simbiosis con rizobios y hongos formadores de micorrizas arbusculares. Sus investigaciones parten del aislamiento, identificación y selección de las mejores interacciones planta microorganismos en laboratorio, invernadero y campo. Igualmente, ha liderado la formulación, escalamiento, registro y venta de siete bioproductos basados en microorganismos benéficos. Ha participado en numerosos proyectos de investigación, y en la conformación, coordinación y puesta en marcha de los programas nacionales de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, de Recursos Biofísicos y en el Banco de Germoplasmas de Microorganismos con Interés en Biofertilización, así como en la Escuela de Pensamiento en Agricultura Tropical. Es la creadora y líder del grupo de investigación Raíces del Futuro. Actualmente se desempeña como Investigadora PhD Sénior del Centro de Investigación Tibaitatá de Agrosavia.

Diana Paola Serralde Ordóñez

dserralde@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0001-6422-5071>

Profesional en Ecología de la Pontificia Universidad Javeriana y magíster en Ciencias-Geofísica de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene experiencia en la relación planta-microorganismo-ambiente, especialmente en la simbiosis con hongos formadores de micorrizas arbusculares y su respuesta nutricional en diferentes cultivos de interés agrícola y forestal. Ha participado en la evaluación de la capacidad de estos microorganismos como potenciales biocontroladores de enfermedades fitosanitarias, como el ataque por *Fusarium oxysporum* en uchuva, y como biorremediadores, por su capacidad para inmovilizar metales pesados en plantas de cacao y arroz. Adicionalmente, ha participado en la evaluación de la aplicación de métodos geofísicos en la agricultura como alternativas de bajo impacto para la prospección del subsuelo. Actualmente se desempeña como Investigadora Máster del Centro de Investigación Tibaitatá de Agrosavia.