

Capítulo 2

Biofertilización de caña de azúcar para panela en la Hoya del Río Suárez con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA)

María Margarita Ramírez Gómez, Diana Paola Serralde Ordóñez, Andrea María Peñaranda Rolón, Wilmar Alexander Wilches Ortiz, Luciano Ramírez, Yuli Marcela Ordóñez Castañeda y Carlos Felipe González-Chavarro

Resumen

Un problema de la caña de azúcar para panela está relacionado con la inadecuada fertilización del cultivo, lo que genera altos costos de producción y un desbalance nutricional. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como una alternativa de biofertilización para mejorar la eficiencia de la nutrición de las plantas. Se realizaron evaluaciones en parcelas demostrativas en los municipios de Ocamonte y Oiba, en Santander, y Chitaraque, en Boyacá. Los beneficios agronómicos se observaron en el incremento de la producción de toneladas de caña y panela (entre el 2 % y el 61 % para caña, y entre el 5 % y el 54 % para panela, dependiendo de la variedad); los económicos, en la reducción de costos de fertilización debido a la sustitución de hasta el 50 % de la fertilización química, y los ambientales, en la reducción de residuos de fertilizantes que contaminan suelos y aguas, así como en la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados, que están asociados con la producción de gases de efecto invernadero. Finalmente, las mejoras en la inocuidad de la panela se relacionan con la reducción de fertilizantes de síntesis química.

Palabras clave: nutrición vegetal, micorrizas arbusculares, biofertilización, análisis económico

Introducción

La caña de azúcar para panela es un cultivo permanente que extrae grandes cantidades de nutrientes del suelo en cada cosecha (Chi et al., 2017; Hussain et al., 2017; Mthimkhulu et al., 2016). Los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar para panela están relacionados con su elevada extracción y remoción de nutrientes del suelo y su alta producción de biomasa. La capacidad de absorción de los nutrientes del suelo cambia con la variedad, ya que, en igualdad de condiciones edafoclimáticas, algunas de ellas pueden absorber mayores o menores cantidades de nutrientes y tener rendimientos diferenciales en producción de caña y panela (t/ha). De acuerdo con Sedyama et al. (2010), la cantidad de nutrientes extraídos por los cultivos ha sido un indicador que permite hacer un mejor uso de los fertilizantes, dependiendo de la variedad y del estado fenológico del cultivo.

En algunas zonas paneleras del país no se tienen planes de fertilización adecuados: muchos productores no fertilizan o lo hacen sin tener en cuenta las condiciones del suelo. Sumado a esto, la fertilización se realiza de forma empírica, no se realizan análisis de suelos y se utiliza el fertilizante más económico del mercado, o el recomendado por los vendedores de insumos, sin ningún criterio técnico. Esta mala práctica ha generado problemas nutricionales en el cultivo y degradación en suelos paneleros, relacionada con problemas de desbalances nutricionales; todo eso, acompañado de problemas de erosión y compactación, afecta la competitividad y sostenibilidad del cultivo.

Para dar respuesta a los problemas nutricionales de la caña de azúcar para panela, AGROSAVIA (antes Corpoica) y el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) han desarrollado investigaciones encaminadas a la optimización de la fertilización del cultivo, a partir de alternativas de nutrición integral que le permiten al productor tener cultivos más productivos, sostenibles y que generen mayor rentabilidad económica y ventajas ambientales.

El proyecto “Recomendaciones de fertilización para cinco regiones productoras de caña panelera en diferentes sistemas de corte” combinó la fertilización orgánica con el uso de fertilizantes de síntesis química, lo que dio como resultado un aumento del 15 %-25 % en la productividad en los sistemas de corte por entresaque y por parejo. Adicionalmente, se evaluó la fertilización utilizada por el agricultor en comparación con el plan de fertilización basado en el análisis de suelos y el fraccionamiento de los fertilizantes de síntesis química a los dos y cuatro meses después de la siembra, plan que presentó un aumento del 20 %-30 % en los rendimientos de caña y panela (Ramírez Durán et al., 2014).

Entre 2015 y 2018 se desarrolló el proyecto “Requerimientos nutricionales de tres variedades de caña de azúcar para panela, determinados a través de curvas de absorción para primer y segundo corte de cultivo en cuatro localidades paneleras del país”, en el cual se determinó la extracción de nutrientes del cultivo de caña de azúcar para panela. Con esta información, se ajustaron las recomendaciones de fertilización bajo las condiciones edafoclimáticas de zonas productoras de caña de azúcar para panela (González Chavarro et al., 2018). Estas investigaciones están orientadas a la obtención de una oferta tecnológica con una base científica sólida, que ofrezca al productor una recomendación de fertilización integral que aporte a la competitividad y sostenibilidad del sector panelero, y a la inocuidad de la panela.

Desde 2018, en el proyecto “Optimización de la fertilización del cultivo de caña panelera a partir de alternativas de nutrición integral y balance de nutrientes”, se recopilaban los resultados previos relacionados con requerimientos nutricionales y fertilización fraccionada, con el fin de optimizar las recomendaciones incorporando el uso de microorganismos benéficos, como parte de una fertilización integral (química y biológica), empleando hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA).

El modelo de investigación desarrollado para la fertilización integral de caña de azúcar para panela parte de la identificación de

las principales comunidades de HFMA asociados de forma natural a suelos paneleros de diversas zonas productoras de Colombia (Santander, Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander, Eje Cafetero, Nariño, Cauca, Antioquia y Cesar). Algunos de estos microorganismos fueron evaluados y seleccionados a nivel de vivero y campo en la Hoya del Río Suarez (HRS), en Boyacá y Santander, bajo un esquema de fertilización integral que dio como respuesta una recomendación de fertilización química y biológica con resultados potenciales en términos de desarrollo agronómico del cultivo y productividad, los cuales fueron validados en parcelas semicomerciales en Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá), comparando la recomendación de uso de HFMA con el manejo convencional del agricultor (Ramírez Gómez et al., 2020; Wilches Ortiz et al., 2019).

Los HFMA son hongos ubicuos en el suelo que pueden establecer una simbiosis obligada con la mayoría de las plantas de interés agronómico. Esta simbiosis mutualista se caracteriza por el intercambio de nutrientes: la planta entrega al hongo polisacáridos como fuente de carbono, y en retorno recibe minerales (Smith & Read, 2008). Algunas de las características que contribuyen al éxito de la simbiosis están relacionadas con la presencia de hifas extrarradicales, que tienen un diámetro de 2-20 μm , actúan como una extensión del sistema radicular de la planta y pueden penetrar en espacios del suelo donde las raíces no alcanzan a llegar y, de esta forma, absorber nutrientes disponibles por fuera de la zona de agotamiento (Nadeem et al., 2014). Por su parte, las hifas intrarradicales crecen en el espacio inter e intracelular en las raíces de las plantas, pueden atravesar la pared celular de las células corticales y luego ramificarse profusamente en el interior de la célula, formando unas estructuras denominadas “arbúsculos”, donde se lleva a cabo el intercambio de nutrientes entre los dos organismos (Hause & Fester, 2005).

Se ha demostrado que diferentes interacciones planta-HFMA exhiben una variedad de respuestas dependiendo de la especie/variedad de la planta y de la especie/aislamiento de HFMA que participa de la

simbiosis (Ceballos et al., 2019; Ortas & Ustuner, 2014), por lo que la investigación sobre la evaluación y selección de inóculos de HFMA debe considerar las condiciones edafoclimáticas, la variedad y las condiciones sobre las que se desarrolla el cultivo.

Los HFMA tienen la facultad de actuar como biofertilizantes al estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante su participación en procesos de nutrición vegetal (Elliott et al., 2021; Frew, 2021); lo hacen como biocontroladores, mitigando el impacto de plagas y enfermedades, y como biorremediadores, inmovilizando metales pesados; todo esto, con un impacto mínimo en el medio ambiente (Mamani de Marchese & Filippone, 2018).

La simbiosis micorrícica se destaca principalmente por incrementar la biomasa vegetal de la planta hospedera y la concentración de nutrientes, lo cual ha llamado la atención en la producción agrícola y ha facilitado el uso de estos hongos como biofertilizantes. De esta forma, se ha propuesto esta estrategia para reducir el uso excesivo de fertilizantes de síntesis química hasta en un 50 %, lo que reduce los costos de producción para el agricultor (Begum et al., 2019).

La eficacia de estos microorganismos ha sido comprobada en cultivos de importancia nacional y mundial como la yuca (*Manihot esculenta*) (Ceballos et al., 2013), la papa (*Solanum tuberosum*) (Hijri, 2016), el arroz (*Oryza sativa*) (Campo et al., 2020), la caña (*Saccharum officinarum*) (Ramírez Gómez et al., 2020), especies forestales (como *Pachira quinata* y *Gmelina arborea*) (Ramírez Gómez et al., 2018), la uchuva (*Physalis peruviana*) (Ramírez Gómez et al., 2008) y el maíz (*Zea mays*) (Serralde & Ramírez, 2004).

Este capítulo tiene como objetivo presentar la fertilización biológica e integral, sus ventajas ambientales y económicas, y su impacto en la competitividad y sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar para panela.

Metodología

La metodología describe las acciones realizadas para el aislamiento e identificación de HFMA en zonas productoras de caña, para determinar su diversidad, y los pasos seguidos para su multiplicación, con el fin de obtener los inóculos que se emplearon en los ensayos de investigación. Igualmente, se describe la metodología desarrollada para el análisis agronómico y agroindustrial a nivel de parcelas demostrativas, así como la utilizada para el análisis económico.

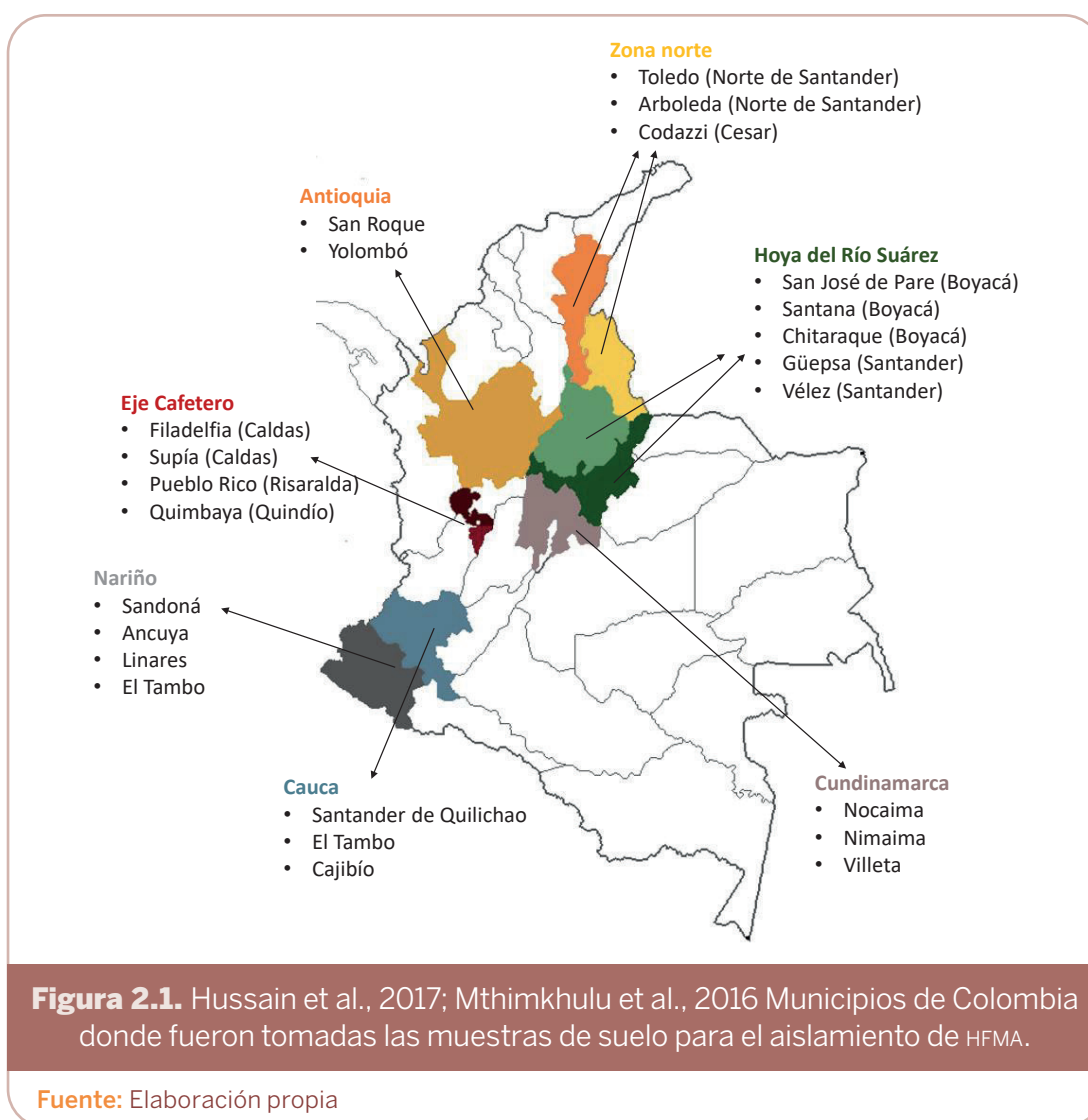
Aislamiento, identificación y multiplicación de HFMA

A partir de muestras de suelo de aproximadamente 1 kg, tomadas en los departamentos de Boyacá y Santander (HRS), Antioquia, Cauca, Cesar, Quindío, Risaralda, Caldas, Nariño, Cundinamarca y Norte de Santander, en zonas productoras de caña de azúcar para panela (figura 2.1), se aislaron, identificaron, multiplicaron y escalaron comunidades nativas de esporas de HFMA.

Para poder identificar los HFMA aislados en diversos suelos, es necesario realizar una multiplicación inicial que permita tener un número suficiente de esporas, para lo cual se utilizó la metodología de Morton y Benny (1990), que consiste en la multiplicación de esporas en plantas trampa, aumentando el volumen de sustrato, con el fin de estimular la esporulación del hongo e incrementar la concentración de las comunidades de HFMA. Este proceso se realizó a partir de muestras de suelo asociadas al cultivo en cada uno de los municipios. Adicionalmente, se tomaron muestras de raíz con el fin de evaluar el nivel de asociación natural de las plantas de caña con HFMA. En total, se muestrearon entre tres y cuatro fincas por municipio, para un total de 75 fincas bajo estudio.

Para el aislamiento y cuantificación de esporas, se empleó la metodología de decantación húmeda, propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), la cual consiste en extraer, a través de la formación de una interfase de solución de sacarosa, las esporas

contenidas en la muestra de suelo. Para la identificación morfológica de esporas, se tomó de cada municipio una muestra compuesta; luego, las esporas aisladas se separaron por sus características macroscópicas observadas en estereoscopio (tamaño, color, brillo, entre otras), y se llevaron a láminas para ser observadas en microscopio, para determinar géneros y morfoespecies, partiendo de las características morfológicas de las esporas (tamaño, color, número de paredes, grosor de las paredes, forma de unión de la hifa con la espora, presencia de escudos o puntos



de germinación, y reacción a colorantes específicos), formación de tipo de espora (glomoide, acaulosporoide, entrophosporoide, gigasporoide y scutellosporoide), formación de esporocarpio, tamaño y color, y las características de germinación. Todas las características están descritas en las claves de clasificación de Schenck y Pérez (1990) y del Invam (2021), así como publicaciones científicas que dan soporte para la clasificación taxonómica de géneros y especies (Oehl & Sieverding, 2004; Oehl et al., 2008, 2010, 2011a, 2011b, 2011c, 2011d; Ortas & Ustuner, 2014; Palenzuela et al., 2008; Redecker et al., 2013; Sieverding & Oehl, 2006).

Una vez identificadas las comunidades a nivel de género o especie, se procedió a multiplicarlas con la metodología señalada anteriormente, para obtener los inóculos con los géneros o especies más frecuentemente aislados, para su evaluación en vivero y campo.

Adicionalmente, se calculó el índice de riqueza (I) para cada uno de los departamentos muestreados, con base en el índice de Margalef, que permite estimar la diversidad de los individuos de las diferentes especies con respecto al número total de individuos de las fincas analizadas en cada departamento:

$$I = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

Donde S es el número de especies encontradas, y N , el 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 se consideran sistemas con alta diversidad de especies (Valdez et al., 2018).

Para la determinación del porcentaje de colonización de raíz, se empleó la metodología de Phillips y Hayman (1970), la cual, mediante una tinción diferencial con azul de tripán, permite la observación en microscopio de las estructuras de los HFMA en el interior de las raíces de la planta hospedera.

Evaluación del efecto de la nutrición integral (química y biológica) en parcelas semicomerciales

Se establecieron en la HRS tres parcelas semicomerciales: en los municipios de Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá). El área total sembrada en cada municipio fue de 1,5 ha. Los tratamientos evaluados fueron: (T1) recomendación de la fertilización integral (química + HFMA), con fraccionamiento de la fertilización química a los dos y cuatro meses después de la siembra y reducción de la dosis del fertilizante químico al 50 % de la recomendada en el análisis de suelos; (T2) manejo agronómico convencional realizado por el agricultor, considerando tanto los productos como las dosis más frecuentemente usados en la región. La inoculación con HFMA se realizó en el momento de la siembra, aplicando en surcos un inóculo con 70 ± 10 esporas de HFMA por gramo de una mezcla de *Rhizophagus irregularis* y *Acaulospora mellea*. Este inóculo fue seleccionado en evaluaciones en vivero, ya que mostró un mejor comportamiento.

En cada municipio se evaluó el comportamiento de tres variedades de caña (CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11) liberadas por AGROSAVIA y distribuidas a los productores; ya que la RD 75-11 era la variedad con mayor difusión en la HRS, para este estudio se consideró como el testigo regional. Adicionalmente, se evaluó la variedad CC 01-1940 en Ocamonte y Chitaraque. El sistema de siembra empleado fue chorrillo sencillo, con una densidad de 8-12 yemas por metro lineal y una distancia entre surcos de 1,3 m, y la inoculación se realizó en el momento de la siembra con 200 kg/ha.

El esquema de fertilización química del manejo convencional del agricultor (T2) se realizó con una mezcla de 50 kg/ha de un producto comercial que contiene NPK (15-4-23) + 4 % de MgO + 2 % de S + 0,1 % de B + 0,1 % de Zn; 100 kg/ha de un producto comercial con NPK (12-24-12) + 2 % de MgO + 1 % de S + 0,04 % de B + 0,02 % de Zn, y 100 kg/ha de un producto con NPK (21-0-0) + 11 % de CaO + 7,5 % de MgO. Para la fertilización recomendada (T1), las dosis de fertilización se realizaron de forma diferencial,

de acuerdo con la variedad y el análisis de suelo de cada municipio. En la tabla 2.1 se presentan las dosis y los fertilizantes empleados. La distribución de cada una de las parcelas se realizó teniendo en cuenta los materiales bajo estudio y los tratamientos en forma aleatoria.

Tabla 2.1. Fuentes y dosis de la fertilización recomendada empleada en las parcelas semicomerciales

Variedad	CC 93-7711		CC 93-7510		RD 75-11		CC 01-1940	
Fuente (kg/ha)	Fertilización al 50% fraccionada (T2)							
	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds	2 mds	4 mds
ON – OP – 60K	29	67	24	55	13	29	29	67
18N – 46P – 60K	33	—	33	—	33	—	33	—
24K – 19S	66	66	61	61	54	54	66	66
3N – 3,6Mg – 8S – 4Zn – 8B – 1,8Si	2	2	2	2	2	2	2	2
20Mn	8	8	6	6	6	6	8	8
3N – 6S – 15Zn – 0,5Cu – 2,5B	4	4	3	3	3	3	4	4
35Mg – 31Si	4	4	4	4	4	4	4	4

MDS: meses después de la siembra

Nota: Las dosis fueron para el 50% de la fertilización + HFMA.

Fuente: Elaboración propia

Análisis económico de las fertilizaciones integral y convencional

Se realizó un seguimiento de los costos directos e indirectos de establecimiento y mantenimiento del cultivo de caña de azúcar para panela en los tres municipios: Ocamonte y Oiba (Santander) y Chitaraque (Boyacá). Los costos incluyeron mano de obra (jornales empleados en la preparación del lote, la siembra, la inoculación de HFMA, la fertilización, el control de malezas, el deshoje, los muestreos y la cosecha) e insumos (semillas, enmiendas, fertilizantes, HFMA y herbicidas).

Resultados

Diversidad de HFMA asociados al cultivo de la caña de azúcar para panela

Los resultados sobre la diversidad se presentan en la figura 2.2, donde se puede observar un valor de esporas de HFMA variable entre los departamentos; el número más alto se presentó en el departamento del Cauca, con 147 esporas/g de suelo; sin embargo, este departamento no tuvo la mayor riqueza de especies (2,6), de acuerdo con el índice de Margalef (Valdez et al., 2018); los mayores índices de riqueza se encontraron en los departamentos de Antioquia (4,8), Santander (4,7) y Norte de Santander (4,3). El bajo número de esporas en algunos departamentos pudo haber sido debido a las prácticas de manejo o a procesos de degradación de suelos como compactación, erosión y desbalance nutricional (figura 2.2). La presencia de esporas de HFMA en todas las muestras analizadas indica que existe un potencial de esporas nativas asociadas a suelos paneleros con capacidad para establecer la asociación planta-HFMA; sin embargo, es necesario realizar una inoculación para aumentar el número de esporas y garantizar, de esta forma, el establecimiento de la asociación en cultivos de caña de azúcar para panela y obtener los beneficios asociados a esta práctica en términos nutricionales.

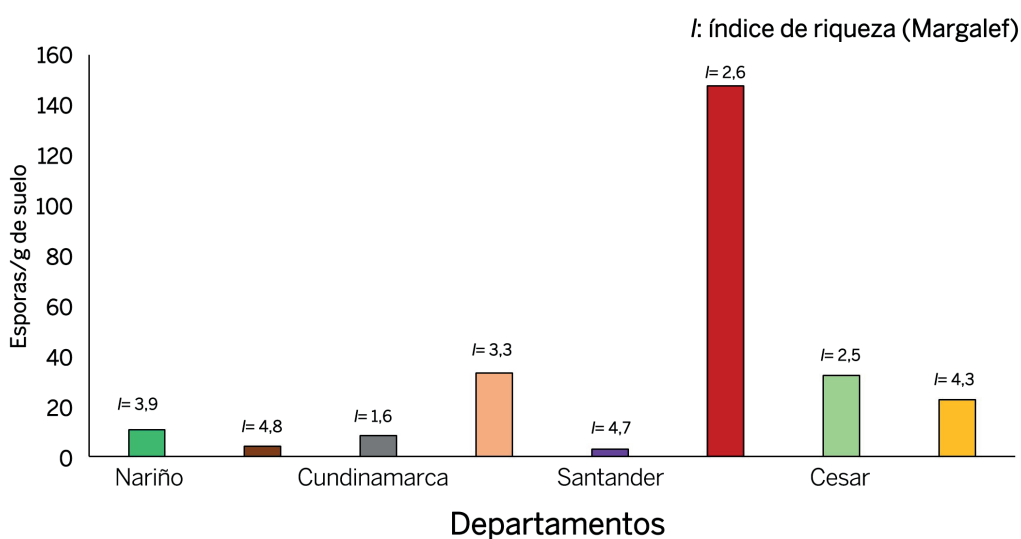


Figura 2.2. Número de esporas de HFMA/g de suelo y riqueza de especies (I) presentes en suelos cultivados con caña de azúcar para panela en diferentes departamentos de Colombia.

Fuente: Elaboración propia

De las muestras de suelo rizosférico del cultivo de caña en los diferentes departamentos, se identificaron 44 morfoespecies, pertenecientes a 6 familias y 12 géneros. En la figura 2.3 se presenta el listado de géneros y especies encontrados, y algunos ejemplos de esporas.

Familias y morfoespecies					
Acaulosporaceae	Glomeraceae	Diversisporaceae	Entrophosporaceae	Gigasporaceae	Racocetraceae
<i>Acaulospora</i> sp.1	<i>Septoglomus constrictum</i>	<i>Diversispora</i> sp.1	<i>Claroideoglomus</i> sp.1	<i>Gigaspora</i> sp.1	<i>Cetraspora</i> sp.1
<i>Acaulospora</i> sp.2	<i>Septoglomus</i> sp.1	<i>Diversispora spurca</i>	<i>Claroideoglomus</i> sp.2		
<i>Acaulospora</i> sp.3	<i>Simiglomus hoi</i>		<i>Entrophospora infrequens</i>		
<i>Acaulospora mellea</i>	<i>Glomus macrocarpum</i>		<i>Entrophospora</i> sp.1		
<i>Acaulospora denticulata</i>	<i>Glomus microcarpum</i>				
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	<i>Glomus brohultii</i>				
<i>Acaulospora reducta</i>	<i>Glomus oureum</i>				
<i>Kuklospora colombiana</i>	<i>Glomus trufemii</i>				
	<i>Glomus sinuosum</i>				
	<i>Glomus globiferum</i>				
	<i>Glomus</i> sp.1				
	<i>Glomus</i> sp.2				
	<i>Funneliformis</i> sp.1				
	<i>Funneliformis</i> sp.2				
	<i>Funneliformis geosporum</i>				
	<i>Rhizoglomus</i> sp.1				
	<i>Rhizoglomus intraradices</i>				
	<i>Rhizoglomus fasciculatum</i>				
	<i>Rhizoglomus manihotis</i>				

Fuente: Elaboración propia

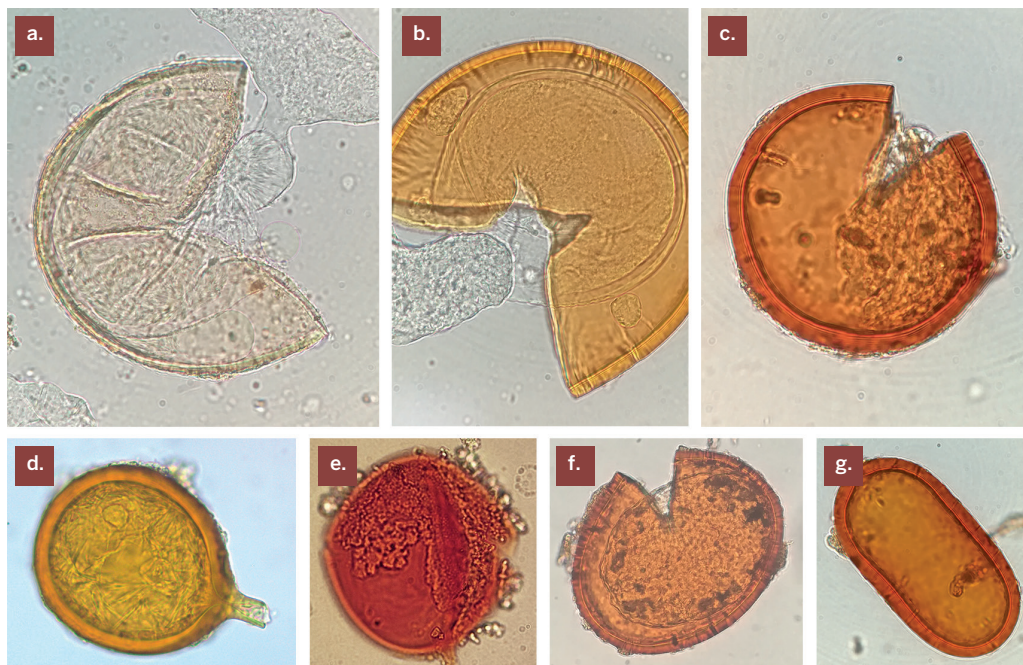


Figura 2.3. Diversidad de esporas de HFMA encontradas en suelos paneleros.
a. *Acaulospora mellea*; b. *Acaulospora* sp.; c. *Claroideoglomus etunicatum* sp.2;
d. *Rhizoglyphus fasciculatum*; e. *Glomus* sp.1; f. *Entrophospora* sp.1;
g. *Glomus trufemii*.

Fotos: Wilmar Alexander Wilches Ortiz

La riqueza de esporas y la diversidad de morfoespecies en las diferentes regiones del país (figura 2.3) reflejan el potencial de esta especie vegetal para asociarse de forma natural a HFMA, posiblemente desde la introducción de la caña de azúcar en el país, en ambientes específicos, aunque todas las familias reportadas de HFMA tienen presencia en toda la región, lo que posiciona al cultivo de caña como un banco de reserva de estos microorganismos y reafirma la capacidad de estos de adaptarse a cambios dinámicos del ambiente para asociarse con la caña (Hijri et al., 2006; Oehl et al., 2004; Moebius-Clune et al., 2013). Agronómicamente, la alta diversidad identificada representa el potencial que tienen los ecosistemas andinos para el establecimiento de asociaciones

simbióticas, ya que, a pesar de ser el cultivo de la caña un agroecosistema con un uso intensivo, la diversidad de HFMA nativos es relativamente alta en algunos departamentos, pese a que diferentes autores han reportado la reducción en la diversidad de HFMA en sistemas agrícolas (Cowden & Peterson, 2009; Jasper et al., 1987; Sieverding et al., 1991).

Efecto de la nutrición integral (química y biológica) en la producción de caña en parcelas semicomerciales en la HRS

A continuación, se describen los resultados relacionados con la producción de caña y panela en los tres municipios de la HRS (figura 2.4). En el municipio de Ocamonte, Santander, se logró un incremento en la producción de caña del 51% para la variedad CC 93-7711 y del 61% para la variedad CC 01-1940 (figura 2.4a), mientras que los incrementos obtenidos en producción de panela fueron del 54% para la variedad CC 93-7711 y del 24% para la variedad CC 01-1940 (figura 2.4b). En el municipio de Chitaraque, Boyacá, para la variedad CC 01-1940, se alcanzaron incrementos del 25% en producción de caña (t/ha) (figura 2.4c) y del 19% en producción de panela (t/ha) (figura 2.4d). En Oiba, Santander, se lograron incrementos en producción de caña del 28% para la variedad CC 93-7510 (figura 2.4e) y en producción de panela del 32%, 35% y 30% para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente (figura 2.4f).

En cuanto a la calidad de la panela (información no mostrada), no se encontraron efectos adversos por la implementación de la fertilización integral. Debido a que en la mayoría de las variedades y ambientes (municipios) la recomendación presenta resultados

favorables en términos de rendimiento de caña y panela, es pertinente proponer una recomendación de uso de la fertilización integral, por sus beneficios en los ingresos de los productores, debido al incremento en rendimiento, la reducción en costos de fertilización (un 50 % menos de fertilizantes de síntesis química) y la reducción en impactos ambientales generados por malas prácticas de fertilización de cultivos.

Análisis económico

En la tabla 2.2 se presenta la estructura de costos directos e indirectos de la producción de caña. Se tomó un promedio de los tres municipios de la HRS (Ocamonte, Oiba y Chitaraque) para cada uno de los tratamientos. En la figura 2.5 se presentan los costos por tonelada de panela y la diferencia porcentual entre los dos tratamientos evaluados. En el caso de Ocamonte, el tratamiento de fertilización (T1) presentó costos superiores del 40 %, y del 12 % para las variedades CC 93-7711 y CC 01-1940, respectivamente, mientras que para las variedades CC 93-7510 y RD 75-11 se presentó una reducción del 19 % y del 5 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento convencional (T2).

Tabla 2.2. Estructura de costos de producción con el tratamiento del agricultor (T2) y con fertilización integral (T1)

Tipos de costos y actividades	Valor total agricultor (COP/ha)	Valor total fertilización integral (COP/ha)
Costos directos		
Preparación del suelo (jornales)	886.000	886.000
Mano de obra	4.581.000	4.692.000
Semilla (cangres)	3.600.000	3.600.000
Fertilizantes	4.824.150	2.537.400
Micorrizas	0	235.000
Otros (equipos y herramientas)	588.000	588.000

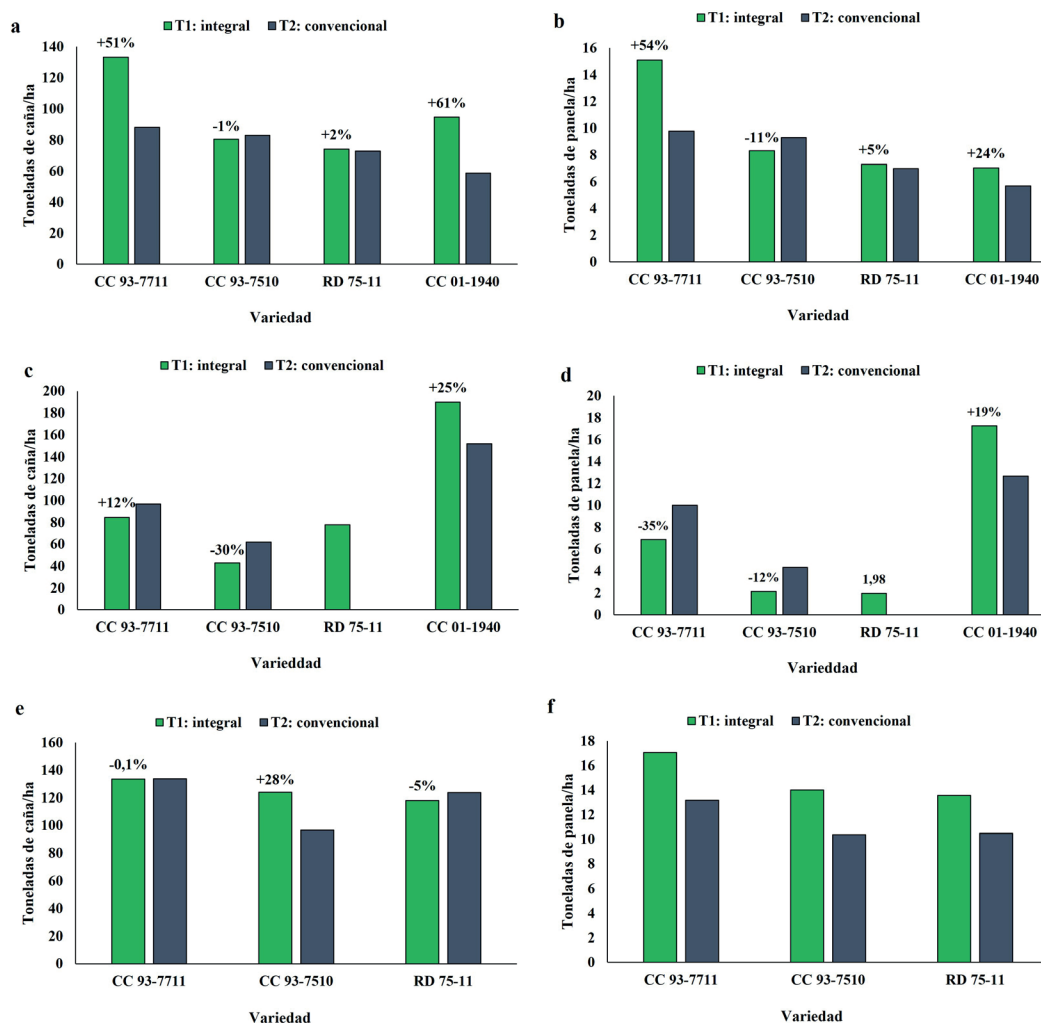


Figura 2.4. Validación de la fertilización integral en parcelas semicomerciales establecidas en los municipios de Ocamonte, Chitaraque y Oiba sobre la producción de caña y panela (t/ha). a y b. Ocamonte; c y d. Chitaraque; e y f. Oiba.

Nota: En Chitaraque, para la variedad RD 75-11, no se presentan datos de rendimiento en caña y panela para el tratamiento T2, ya que el productor cosechó anticipadamente y no tomó la información requerida.

Fuente: Elaboración propia

Tipos de costos y actividades	Valor total agricultor (COP/ha)	Valor total fertilización integral (COP/ha)
Corte y alce	6.232.000	6.232.000
<i>Subtotal de costos directos</i>	<i>20.711.150</i>	<i>18.770.400</i>
Costos indirectos		
Arriendo	1.077.000	1.077.000
Costos totales de cultivo	21.788.150	19.847.400

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Chitaraque, solamente para la variedad CC 01-1940, el tratamiento de fertilización integral presentó un costo un 25 % más alto que el tratamiento convencional; para las otras variedades, CC 93-7711 y CC 93-7510, el costo fue un 38 % y un 54 % menor que el tratamiento convencional. En el caso de Oiba, el tratamiento de fertilización integral presentó incrementos del 18 %, 22 % y 17 % para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente, con relación al tratamiento convencional. Lo anterior se relaciona con los resultados de rendimiento de panela obtenidos, los cuales fueron superiores para la fertilización integral en esta misma localidad.

Para Ocamonte, se observaron reducciones en los costos de producción de panela del 19 % y 5 % por el uso de la recomendación de fertilización integral para las variedades CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente, con relación a la fertilización convencional. Para la variedad CC 01-1940, los costos de producción de panela fueron mayores, debido a que el rendimiento de panela fue significativamente superior. Para el caso de Chitaraque, la reducción en los costos de producción de panela con el tratamiento de fertilización integral fue del 38 % y 54 % en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510, respectivamente, y de la variedad RD 75-11 no se pudo hacer la evaluación del tratamiento de fertilización integral por cosecha anticipada por parte del agricultor.

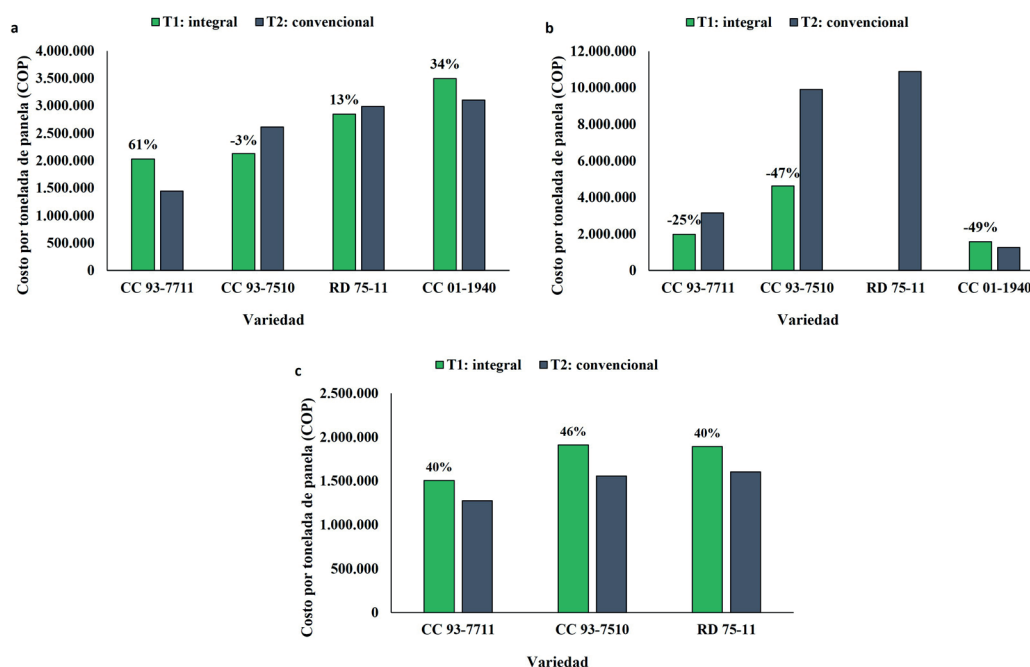


Figura 2.5. Costos por tonelada de panela para las variedades y los municipios estudiados con dos tratamientos de fertilización: integral y convencional. a. Ocamonte; b. Chitaraque; c. Oiba.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En los sistemas de producción de caña de azúcar para panela se encuentra una asociación natural de HFMA con plantas de caña que difiere dependiendo de las condiciones edafoclimáticas y del manejo del cultivo en cada municipio. La diversidad de HFMA en las zonas productoras de caña para panela se encuentra en niveles relativamente altos en los departamentos de Antioquia, Santander y Norte de Santander, y en niveles bajos en el departamento de Cundinamarca, debido a las prácticas de manejo o a los procesos de degradación de suelos. A nivel semicomercial, se pudo evidenciar el beneficio del uso de la fertilización integral, considerando el fraccionamiento y la reducción en un 50 % de la dosis de fertilizantes de síntesis química y el uso de HFMA. Es

así como en el municipio de Ocamonte, Santander, se obtuvieron incrementos del 54 % y 24 % en la producción de panela para las variedades CC 93-7711 y CC 01-1940, respectivamente; en Chitaraque, Boyacá, para la variedad CC 01-1940, se alcanzaron incrementos del 25 % en la producción de caña (t/ha) y del 19 % en la producción de panela (t/ha), y en Oiba, Santander, se lograron incrementos en producción de caña del 28 % para la variedad CC 93-7510 y en producción de panela del 32 %, 35 % y 30 % para las variedades CC 93-7711, CC 93-7510 y RD 75-11, respectivamente. El uso de HFMA es una estrategia que permite incrementar los niveles de competitividad y sostenibilidad del sistema de producción, sin afectar la calidad de la panela y mitigando el impacto ambiental negativo de la baja eficiencia en el uso de fertilizantes de síntesis química.

Agradecimientos

El proyecto “Optimización de la fertilización del cultivo de caña panelera a partir de alternativas de nutrición integral y balance de nutrientes” se ha podido ejecutar gracias a la financiación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y al aporte de AGROSAVIA, que brindó el recurso humano y la infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto. Igualmente, el equipo de trabajo quiere agradecer a los productores directamente relacionados con las fincas donde se desarrollaron las evaluaciones, y a quienes participaron en los eventos de capacitación y vinculación de tecnología.

Referencias

- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, artículo 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>

- Campo, S., Martín-Cardoso, H., Olivé, M., Pla, E., Catala-Forner, M., Martínez-Eixarch, M., & San Segundo, B. (2020). Effect of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi on growth, productivity and blast resistance in rice. *Rice*, 13, artículo 42. <https://doi.org/10.1186/s12284-020-00402-7>
- Ceballos, I., Mateus, I. D., Peña, R., Peña-Quemba, D. C., Robbins, C., Ordoñez, Y. M., Rosikiewicz, P., Rojas, E. C., Thuita, M., Mlay, D. P., Masso, C., Vanlauwe, B., Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2019). Using variation in arbuscular mycorrhizal fungi to drive the productivity of the food security crop cassava. *BioRxiv*, artículo 830547. <https://doi.org/10.1101/830547>
- Ceballos, I., Ruiz, M., Fernández, C., Peña, R., Rodríguez, A., & Sanders, I. R. (2013). The *in vitro* mass-produced model mycorrhizal fungus, *Rhizophagus irregularis*, significantly increases yields of the globally important food security crop cassava. *Plos One*, 8(8), artículo e70633. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070633>
- Chi, L., Mendoza-Vega, J., Huerta, E., & Álvarez-Solís, J. D. (2017). Effect of long-term sugarcane (*Saccharum* spp.) cultivation on chemical and physical properties of soils in Belize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(7), 741-755. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1254794>
- Cowden, C. C., & Peterson, C. J. (2009). A multi-mutualist simulation: Applying biological market models to diverse mycorrhizal communities. *Ecological Modelling*, 220(12), 1.522-1.533. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.03.028>
- Elliott, A. J., Daniell, T. J., Cameron, D. D., & Field, K. J. (2021). A commercial arbuscular mycorrhizal inoculum increases root colonization across wheat cultivars but does not increase assimilation of mycorrhiza-acquired nutrients. *Plants, People, Planet*, 3(5), 588-599. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10094>
- Frew, A. (2021). Contrasting effects of commercial and native arbuscular mycorrhizal fungal inoculants on plant biomass allocation, nutrients, and phenolics. *Plants, People, Planet*, 3(5), 536-540. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10128>
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (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)

- González Chavarro, F., Cabezas Gutiérrez, M., Ramírez-Gómez, M., & Ramírez Durán, J. (2018). Curvas de absorción de macronutrientes en tres variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) para panela, en la Hoya del Río Suárez. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 395-404. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.995>
- Hause, B., & Fester, T. (2005). Molecular and cell biology of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Planta*, 221(2), 184-196. <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-004-1436-x>
- Hijri, I., Sýkorová, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Maeder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology*, 15(8), 2.277-2.289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2006.02921.x>
- Hijri, M. (2016). Analysis of a large dataset of mycorrhiza inoculation field trials on potato shows highly significant increases in yield. *Mycorrhiza*, 26(3), 209-214. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0661-4>
- Hussain, S., Anwar-ul-Haq, M., Hussain, S., Akram, Z., Afzal, M., & Shabbir, I. (2017). Best suited timing schedule of inorganic NPK fertilizers and its effect on qualitative and quantitative attributes of spring sown sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 66-71. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.02.004>
- Invam. (2021). *Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)*. <https://invam.ku.edu/>
- Jasper, D. A., Robson, A. D., & Abbott, L. K. (1987). The effect of surface mining on the infectivity of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Australian Journal of Botany*, 35(6), 641-652. <https://doi.org/10.1071/BT9870641>
- Mamani de Marchese, A., & Filippone, M. P. (2018). Bioinsumos: componentes claves de una agricultura sostenible. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 38(1). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S2314-369X2018000100001&script=sci_arttext&lng=es
- Moebius-Clune, D. J., Moebius-Clune, B. N., Van Es, H. M., & Pawlowska, T. E. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with a single agronomic plant host across the landscape: Community differentiation along a soil textural gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 64, 191-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.12.014>

- Morton, J. B., & Benny, G. L. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): A new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*, 37, 471-491. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19912307931>
- Mthimkhulu, S., Podwojewski, P., Hughes, J., Titshall, L., & Van Antwerpen, R. (2016). The effect of 72 years of sugarcane residues and fertilizer management on soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 225, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.002>
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, 32(2), 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Oehl, F., Alves a Silva, G., Goto, B. T., Costa Maia, L., & Sieverding, E. (2011a). Glomeromycota: Two new classes and a new order. *Mycotaxon*, 116(1), 365-379. <https://doi.org/10.5248/116.365>
- Oehl, F., Da Silva, D. K. A., Maia, L. C., De Sousa, N. M. F., Vieira, H. E. E., & Da Silva, G. A. (2011b). *Orbispora* gen. nov., ancestral in the *Scutellosporaceae* (Glomeromycetes). *Mycotaxon*, 116(1), 161-169. <http://dx.doi.org/10.5248/116.161>
- Oehl, F., Da Silva, G. A., Goto, B. T., & Sieverding, E. (2011c). *Glomeromycota*: Three new genera and glomoid species reorganized. *Mycotaxon*, 116(1), 75-120. <https://doi.org/10.5248/116.75>
- Oehl, F., Da Silva, G. A., Sánchez-Castro, I., Goto, B. T., Maia, L. C., Vieira, H. E. E., Barea, J.-M., Sieverding, E., & Palenzuela, J. (2011d). Revision of *Glomeromycetes* with entrophosporoid and glomoid spore formation with three new genera. *Mycotaxon*, 117(1), 297-316. <https://doi.org/10.5248/117.297>
- Oehl, F., De Souza, F. A., & Sieverding, E. (2008). Revision of *Scutellospora* and description of five new genera and three new families in the arbuscular mycorrhiza-forming Glomeromycetes. *Mycotaxon*, 106(1), 311-360.
- Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., Van der Heijden, M., & Sieverding, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil*

- Biology and Biochemistry*, 42(5), 724-738. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.006>
- Oehl, F., & Sieverding, E. (2004). *Pacispora*, a new vesicular arbuscular mycorrhizal fungal genus in the Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany*, 78, 72-82. https://www.researchgate.net/publication/279937627_Pacispora_a_new_vesicular_arbuscular_mycorrhizal_fungal_genus_in_the_Glomeromycetes
- Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138(4), 574-583. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1458-2>
- Ortas, I., & Ustuner, O. (2014). Determination of different growth media and various mycorrhizae species on citrus growth and nutrient uptake. *Scientia Horticulturae*, 166, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.014>
- Palenzuela, J., Ferrol, N., Boller, T., Azcón-Aguilar, C., & Oehl, F. (2008). *Otospora bareai*, a new fungal species in the Glomeromycetes from a dolomitic shrub land in Sierra de Baza National Park (Granada, Spain). *Mycologia*, 100(2), 296-305. <https://doi.org/10.3852/mycologia.100.2.296>
- 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 Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 183-195. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-87062014000200005
- Ramírez Gómez, M., Roveda Hoyos, G., Bonilla Buitrago, R., Cabra Julio, L., Peñaranda Rolón, A., López Jiménez, M., Serralde, D. P., Tamayo Vélez, Á., Navas Ríos, G. E., & Díaz Diez, C. A. (2008). *Uso y manejo de biofertilizantes en el cultivo de la uchuva*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Ramírez Gómez, M. M., Peñaranda Rolon, A. M., Pérez Moncada, U. A., & Serralde, D. P. (2018). Biofertilización con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en especies forestales en vivero.

- Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(2), 15-25. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.1162>
- Ramírez Gómez, M. M., Peñaranda Rolón, A. M., Serralde Ordóñez, D. P., & Pérez Moncada, U. A. (2020). *Producción y aplicación de hongos formadores de micorrizas en vivero de caña para panela. Manual práctico de uso*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403732>
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., & Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), 515-531. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Schenck, N. C., & Pérez, Y. (1990). *Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi* (vol. 286). Synergistic Publications.
- Sediyama, M. A. N., Santos, M. R., Vidigal, S. M., Santos, I. C., & Salgado, L. T. (2010). Ocorrência de plantas daninhas no cultivo de beterraba com cobertura morta e adubação orgânica. *Planta Daninha*, 28(4), 717-725.
- Serralde, A. M., & Ramírez, M. M. (2004). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 5(1), 31-40. https://doi.org/10.21930/rcta.vol5_num1_art:22
- Sieverding, E., Friedrichsen, J., & Suden, W. (1991). *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems*. Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit.
- Sieverding, E., & Oehl, F. (2006). Revision of *Entrophospora* and description of *Kuklospora* and *Intraspora*, two new genera in the arbuscular mycorrhizal Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 80(1), 69-81. https://www.researchgate.net/publication/284793137_Revision_of_Entrophospora_and_description_of_Kuklospora_and_Intraspora_two_new_genera_in_the_arbuscular_mycorrhizal_Glomeromycetes
- Smith, S. E., & Read, D. (2008). *The mycorrhizal symbiosis*. Academic Press.
- 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. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1.674-1.682.

Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolon, A. M., & Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 175-184. <https://doi.org/10.28940/tl.v37i2.481>