

# Uso de Micorrizas Arbusculares en dos variedades de caña de azúcar para producción de panela en Suaita-Santander, Colombia

## Use of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in two varieties of sugarcane for panela in Suaita-Santander, Colombia

Wilmar Alexander Wilches Ortiz<sup>1</sup>, María Margarita Ramírez Gómez<sup>2</sup>, Laura María Reyes Méndez<sup>3</sup>, Urley Adrián Pérez Moncada<sup>4</sup>, Diana Paola Serralde Ordoñez<sup>5</sup>, Andrea María Peñaranda Rolón<sup>6</sup>



Siembra 9(1) (2022): e3802

Recibido: 28/04/2022 Revisado: 02/06/2022 Aceptado: 15/06/2022

<sup>1</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera – Bogotá. CP 250047. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ wwilches@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-2905-3347>

<sup>2</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera – Bogotá. CP 250047. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ mmramirez@agrosavia.co

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

<sup>3</sup> Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD. Escuela de Ciencias Básicas/Tecnología e Ingeniería. Transversal 31 N° 12-38 sur Bogotá, D.C. CP 111511. Bogotá DC, Colombia.

✉ laura.reyes@unad.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-3782-8747>

<sup>4</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera – Bogotá. CP 250047. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ uperez@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-3069-3237>

<sup>5</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera – Bogotá. CP 250047. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ dserralde@agrosavia.co

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

<sup>6</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera – Bogotá. CP 250047. Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

✉ apenaranda@agrosavia.co

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

\*Autor de correspondencia: wwilches@agrosavia.co

### Resumen

La producción de caña panelera en Colombia se ve limitada por la disponibilidad de material de siembra y la nutrición de la planta. Los Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) ayudan al intercambio y movilidad de nutrientes al asociarse con la planta, mejorando la producción del cultivo. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficacia de dos HFMA en dos variedades de caña de azúcar para panela en la localidad de Suaita, Santander. Se evaluó los tratamientos T1: *Acaulospora mellea*, T2: *Rhizoglyphus irregularis*, T3: Control 1 (sin inoculación) y T4: Control 2 (100% fertilización) en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510. Estos tratamientos se implementaron en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Se evaluó la altura de planta, diámetro del tallo, contenido de clorofila, absorción de nutrientes y materia seca en plantas de caña. En la variedad CC93-7711 se presentaron diferencias significativas para la absorción de N, S, Fe, y Mn, con una mejor absorción para T2, y en esta variedad el contenido de clorofila a los 15 meses después de trasplante fue mayor para T1 y T2. En la variedad 93-7510 se presentaron diferencias significativas a los 8 meses después del trasplante, siendo T1 el mejor tratamiento para altura de planta; T2 el mejor tratamiento para clorofila total, y para absorción de Mn a los 15 meses después del trasplante. A los 15 meses después del trasplante, las dos variedades con los tratamientos T1 y T2 fueron mejores que los controles para las variables de altura de planta, diámetro de tallo, clorofila total y materia seca. Se presentó correlación positiva entre la presencia de *A. mellea* con la absorción de Na, Cu, Mn, S, N y P y la presencia de *Rhizoglyphus irregularis* con Mg, Fe y Ca. Los HFMA pueden sustituir el 50 % de la fertilización sintética, haciéndola más efectiva, con un mayor contenido de materia seca.

**Palabras clave:** azúcar no centrifugado, caña de azúcar, *Acaulospora mellea*, *Rhizoglyphus irregularis*, nutrición.

### Abstract

Sugarcane for panela production in Colombia is limited due to problems of planting material provision and plant nutrition. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) help the exchange and mobility of nutrients in the plant, improving crop production. The objective of this study was to

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

e-ISSN: 2477-8850

ISSN: 1390-8928

Periodicidad: semestral

vol. 9, núm. 1, 2022

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3802>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

evaluate AMF in two varieties of sugarcane for panela production in the town of Suaita, Santander. Four treatments were evaluated: T1: *Acaulospora mellea*, T2: *Rhizogloium irregulare*, T3: Control 1 (without inoculation) and T4: Control 2 (100% of chemical fertilization) in the varieties CC 93-7711 and CC 93-7510A. Treatments were set up in complete randomized block design with three replications. Plant height, stem diameter, chlorophyll content, nutrient absorption and dry matter content were evaluated in this study. Significant differences were found in the variety CC93-7711 for absorption of N, S, Fe, and Mn, being T2 the best treatment, and for chlorophyll content at 15 months after transplant the best treatments were T1 and T2. In the variety 93-7510, significant differences were found at 8 months after transplanting for plant height being T1 the best treatment, and for total chlorophyll T2. At 15 months after transplant the best treatment was T2 for Mn absorption. The two varieties at 15 months after transplant presented the highest values for T1 and T2 compared to the two controls for plant height, stem diameter, total chlorophyll, and dry matter content. The correlation analysis was positive for *A. mellea* with the absorption of Na, Cu, Mn, S, N and P, and for *Rhizogloium irregulare* with absorption of Mg, Fe and Ca. The AMF can replace 50% of the synthetic fertilization, making it more effective with higher dry matter content.

**Keywords:** non-centrifuged sugar, sugarcane, *Acaulospora mellea*, *Rhizogloium irregulare*, nutrition.

## 1. Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es uno de los cultivos más apreciados, debido a su valor nutricional y versatilidad como materia prima para la industria alimentaria en muchos países de las regiones tropicales y subtropicales, en donde se utiliza como recurso para la producción de derivados de la caña de azúcar, incluyendo los más comunes como azúcar de caña, jugo, jarabe y azúcar de caña no centrifugado (NCS, por sus siglas en inglés) (Cifuentes *et al.*, 2021; Juntahum *et al.*, 2022). El NCS es el término técnico utilizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] para referirse a un producto sólido, no refinado y poco procesado, obtenido de la evaporación térmica del jugo de la caña de azúcar (FAO, 1994).

En Colombia, al NCS se le denomina “panela”, nombre local que también usan en Bolivia, Ecuador, Guatemala y Panamá, en otros países se le conoce como chancaca (Chile, Perú), raspadura (Bolivia, Brasil, Cuba, Panamá), piloncillo (México), papelón (Venezuela) y jaggery (India) (Asikin *et al.*, 2014; Jaffé, 2012). Colombia es el segundo productor de panela (NCS) en el mundo, después de la India (Gutiérrez-Mosquera *et al.*, 2018) y de acuerdo con las cifras del balance alimentario más reciente publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, en Colombia, la panela presenta un consumo promedio per cápita de 24,8 kg año<sup>-1</sup>, con aportes de proteínas de 0,68 g día<sup>-1</sup> y cerca de 23 kilocalorías persona<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, que representan cerca del 8 % del consumo calórico de la población (FAO, 2018).

En Colombia, el cultivo de la caña de azúcar para panela se desarrolla en condiciones de ladera. La producción de panela depende de las recomendaciones de manejo agronómico, ajustadas a diferentes regiones productoras del país. Este manejo agronómico difiere en los sistemas de siembra, variedades, manejo de plagas, planes de fertilización y en el sistema de corte empleado por zona. En algunas zonas del país no se realizan planes de fertilización de acuerdo con el análisis químico del suelo, aunque es reconocida la importancia de la fertilización para aumentar el rendimiento y la productividad de la caña de azúcar, debido a su facilidad de uso y eficiencia.

El N y el K se requieren en grandes cantidades y su absorción corresponde al patrón de acumulación de biomasa. Por otra parte, el P se considera esencial para el macollamiento, crecimiento de raíces y brotes (Kingston, 2014). El uso de fertilizantes minerales fosfatados es ineficiente, dado que la fuerte absorción y fijación de los óxidos metálicos en la matriz del suelo se presentan en formas insolubles, inmovilizadas y/o precipitadas. Además, la fuente de los fertilizantes con P mineral (roca fosfórica) es un recurso natural finito que se espera que dure solo unos pocos cientos de años según la tasa actual de consumo (Baker *et al.*, 2015; Walan *et al.*, 2014). Una de las principales limitantes de la mayoría de los sistemas de producción de caña panelera a nivel nacional está relacionada con estrés hídrico y nutricional. En este sentido, los hongos formadores de micorrizas arbusculares [HFMA] incrementan la capacidad de toma de agua y aumentan la eficiencia en el transporte de nutrientes del suelo a la planta, en específico al P poco móvil en el suelo, al extender las hifas extraradicales a través de las zonas rizosféricas, lo que significa incremento en la generación de condiciones favorables para el desarrollo de biomasa vegetativa, mejorando la traslocación de nutrientes, producción de frutos, rendimiento de la cosecha (calidad e inocuidad) y resistencia de las plantas frente a los ataques de plagas y enfermedades (Rouphael *et al.*, 2015; Smith y Read, 2008; Sun *et al.*, 2018).

Además, los HFMA pueden afectar la fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico al facilitar las tasas fotosintéticas en las plantas hospedantes, aumentando el sumidero de C y el movimiento de fotoasimilados desde las partes aéreas hasta las raíces (Gavito *et al.*, 2019). En cultivos semipermanentes como la caña panelera, los HFMA juegan un papel importante en el ciclaje y reciclaje de nutrientes, actividades que permiten mejoras sustanciales en la nutrición del cultivo, reducción en el uso de abonos orgánicos, fertilizantes y enmiendas minerales. Varias especies de HFMA tienen asociaciones simbióticas con la caña de azúcar (Juntahum *et al.*, 2020; Kumalawati *et al.*, 2014; Pontes *et al.*, 2017; Wilches Ortiz *et al.*, 2019). Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de HFMA en dos variedades de caña de azúcar para panela en la localidad de Suaita, Santander.

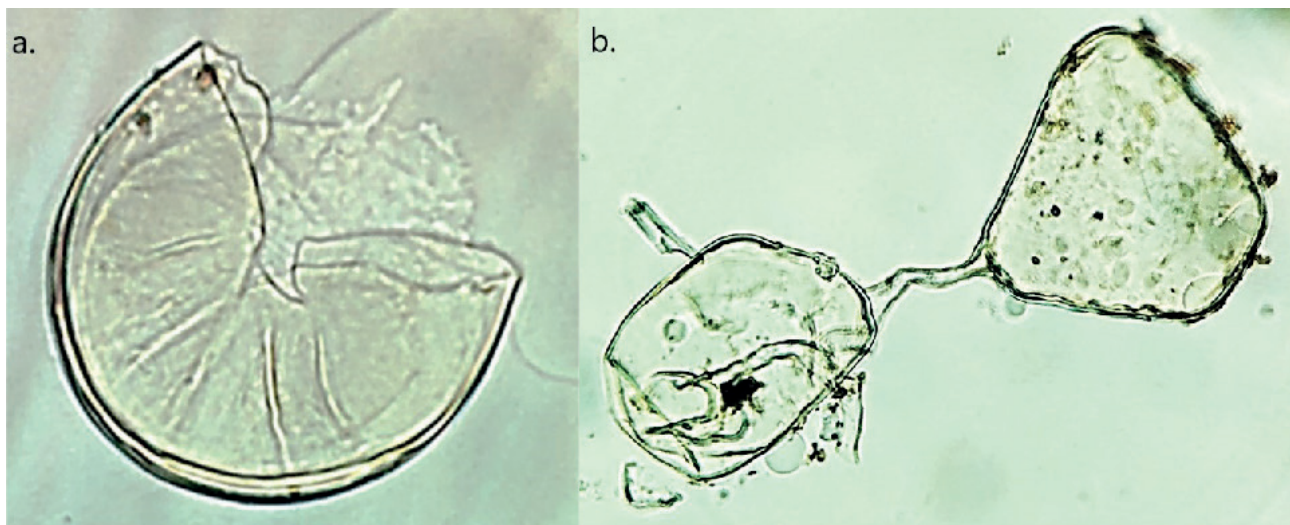
## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Localización y material vegetal

El ensayo se estableció a una altura de 1.233 m s.n.m. con un área de 3.292 m<sup>2</sup> en el municipio de Suaita, Santander (Colombia). Se utilizaron dos variedades de caña de azúcar para producción de panela del convenio Agrosavia-Cenicaña (Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia), las cuales fueron entregadas por Agrosavia en el 2013 (CC 93-7711 - Pierna Bella) y 2014 (CC 93-7510 - Vende Finca). La germinación de las variedades de caña se realizó en el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (C. I. Cimpa, Agrosavia) mediante extracción manual de semilla asexual de caña, dispuestas en canastillas con sustrato inerte.

### 2.2. Inoculación y establecimiento del experimento

De la colección de trabajo de microorganismos con interés en biofertilizantes [CMIB] del banco de germoplasma de Agrosavia, se utilizaron los HFMA *Rhizoglyphus irregularis* y *Acaulospora mellea* (Figura 1), las especies mencionadas presentaron una respuesta positiva en condiciones de vivero en diferentes variedades de caña de azúcar (Wilches Ortiz *et al.*, 2019). Para la multiplicación de los HFMA se utilizó sustrato suelo:arena (2:1 v / v) en materas de 500 g en hospederos de plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Cinco meses después se realizó control de calidad del inóculo mediante la técnica de tamizado húmedo y decantación propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), se cuantificó el número de esporas para realizar inoculación en vivero con 70 esporas plántula<sup>-1</sup> en semilleros de las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510 y posterior trasplante a campo.



**Figura 1.** Imágenes microscópicas con aumento 40x de esporas de los HFMA inoculados en solución de alcohol polivinílico-ácido láctico glicerol (PVLG). a) *Acaulospora mellea*; b) *Rhizoglyphus irregularis*.

**Figure 1.** Microscopic images with 40x magnification of AMF spores inoculated in polyvinyl alcohol-lactic acid glycerol (PVLG) solution. a) *Acaulospora mellea*; b) *Rhizoglyphus irregularis*.

### 2.3. Diseño experimental

El diseño correspondió a bloques completos al azar [BCA] con tres repeticiones, utilizando como material vegetal las dos variedades en estudio (CC 93-7711 y CC 93-7510), considerando cada una como un ensayo independiente. Se evaluaron cuatro tratamientos con y sin microorganismos HFMA (Tabla 1). Los tratamientos control corresponden a dos dosis de fertilización química, uno con el 50 % (igual que los tratamientos de inoculación) y un control con el 100 % para la fertilización química, que se realiza teniendo en cuenta las características del suelo. La distribución de los tratamientos en las parcelas se realizó al azar y se bloqueó en contra de la pendiente del terreno en cada variedad vegetal.

**Tabla 1.** Tratamientos en la localidad de Suaita.  
*Table 1.* Treatments in the site of Suaita.

Tratamiento	Microorganismos	Descripción	Fertilización química
T1	HFMA 1	<i>Acaulospora mellea</i>	50 %
T2	HFMA 2	<i>Rhizoglyphus irregularis</i>	50 %
T3	Sin inoculación	Control absoluto	50 %
T4	Sin inoculación	Control manejo convencional	100 %

Cada parcela experimental, estuvo conformada por 7 surcos de 6,6 m lineales (51,48 m<sup>2</sup>), con distancias entre parcelas de 2 m como área de tránsito, la distancia de siembra utilizada entre plantas fue de 0,6 m y entre surcos de 1,3 m (77 plantas/parcela), el área útil experimental fue de 1.235,52 m<sup>2</sup> con 175,67 m<sup>2</sup> de plantas para efecto borde y un área de tránsito de 643,8 m<sup>2</sup>, para un total de 2.055 m<sup>2</sup>.

### 2.4. Manejo agronómico del cultivo

Las prácticas de mantenimiento incluyeron el fraccionamiento de la fertilización y control de malezas a los dos y cuatro meses de edad. El esquema de fertilización integró los requerimientos reportados por estudios anteriores en caña panelera (González Chavarro *et al.*, 2018; Manrique Estupiñán, 2000) estimando alcanzar una producción de 100 toneladas de caña por hectárea [TCH].

El plan de fertilización tuvo como base los siguientes requerimientos nutricionales por hectárea de elementos mayores y menores: N (170 kg), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (50 kg), K<sub>2</sub>O (240 kg), Ca (90 kg), MgO (60 kg), S (45 kg), Si (320 kg), Fe (12 kg), Mn (1,5 kg), Cu (0,128 kg), Zn (1,8 kg), B (0,522 kg).

### 2.5. Variables de seguimiento en caña

Se evaluaron variables de respuesta agronómica de altura, diámetro de tallo, clorofila total y materia seca a los 8 y 15 meses después del trasplante (mdt). Se realizó un muestreo por método destructivo de cosecha y se tomó información de altura de la planta (m) hasta la primera lígula visible, diámetro de tallos (cm) en cinco (5) plantas al azar en dos (2) m lineales cosechados. La clorofila total (unidades SPAD) se evaluó en hojas con medidor automático de clorofila MC-100®.

Para la determinación de la materia seca, en seis (6) m lineales se cuantificó y se tomó peso fresco de hojas, yaguas, cogollos y tallos. Del total de material se seleccionó una muestra de 250 gramos para secado a 70 °C en horno por 72 horas, para obtener el peso de materia seca (MS). Adicionalmente, otra muestra (200-250 g) se envió al laboratorio de química de suelos, aguas y plantas de Agrosavia C. I. Tibaitatá para la determinación de la concentración de macro (N-P-K-Ca-Mg-Na-S) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B) en los órganos monitoreados.

Las técnicas para la extracción y cuantificación de minerales en tejidos utilizadas por el laboratorio de Agrosavia fueron el método 960.52 oficial de la AOAC Kjeldahl por volumetría para N (Latimer, 2016), y por espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés) Perkin Elmer Avio 500 en la determinación de P, K, Ca, Mg, Na, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B (Khan *et al.*, 2022).

Para la determinación de la materia seca [MS] (kg ha<sup>-1</sup>) y nutrientes (kg ha<sup>-1</sup>) se utilizaron las fórmulas descritas por González Chavarro *et al.* (2018), dividiendo el peso final [P<sub>f</sub>] del peso inicial [P<sub>i</sub>] posterior al secado para la obtención del porcentaje de materia seca (ecuación [1]). Para la cantidad de materia seca por hectárea se multiplicó el porcentaje de MS por la materia fresca por hectárea [MF] (kg ha<sup>-1</sup>) (ecuación [2]).



Y para la absorción de nutrientes se utilizaron los valores reportados de concentración de nutrientes [Cn] (%) por el laboratorio, en donde el valor de cada nutriente fue convertido a kg ha<sup>-1</sup> de acuerdo con la ecuación [3].

$$MS(\%) = \left(\frac{P_i}{P_f}\right) \times 100 \tag{1}$$

$$MS(\text{kg ha}^{-1}) = (MS(\%) \times MF) \tag{2}$$

$$\text{Nutriente}(\text{kg ha}^{-1}) = \left(\frac{Cn(\%) \times MS}{100}\right) \tag{3}$$

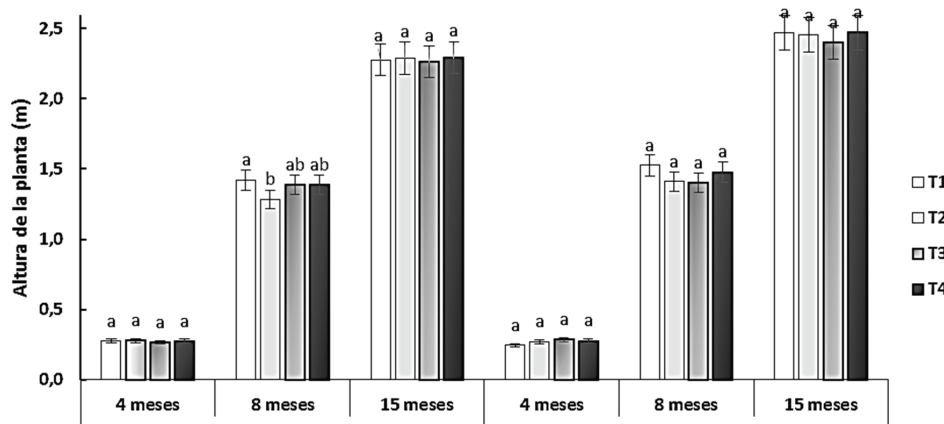
### 2.6. Análisis estadísticos

Todos los experimentos se realizaron por triplicado y los datos se expresaron como media ± desviación estándar. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza [ANOVA] después de comprobar la normalidad y la homogeneidad de las varianzas. Los valores medios de todos los tratamientos se compararon en busca de diferencias significativas mediante prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), adicionalmente se realizaron análisis de correspondencia canónica entre los tratamientos y la absorción de nutrientes por la planta. Se utilizó el software estadístico R® (R Core Team, 2020) con las librerías corrplot, CCA (González y Déjean, 2021) y ggplot2 (Wickham, 2016).

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Variables en caña de azúcar

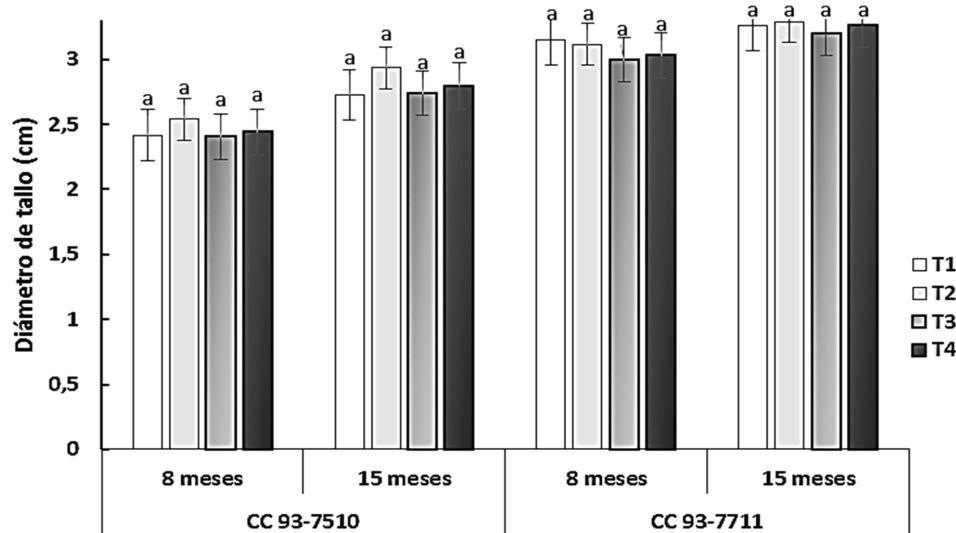
En la Figura 2, se observan los resultados obtenidos en altura de caña de azúcar a los 8 y 15 meses después de trasplante [mdt]. De acuerdo al ANOVA, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la variedad CC 93-7711 en los dos momentos de muestreo; para la variedad CC 93-7510 a los 8 mdt se presentaron diferencias significativas, en donde el tratamiento de inoculación T1 registró los valores más altos de altura, con 1,42 m, seguidos de los controles sin inoculación y 100 % de fertilización química, con 1,39 m cada uno, y en último lugar, el tratamiento T2, con 1,28 m. Otros autores atribuyen al uso de HFMA un incremento en la altura de plantas de caña de azúcar (Juntahum *et al.*, 2022; Sulistiono *et al.*, 2017; Wilches Ortiz *et al.*, 2019), aunque a los 15 mdt no se presentaron diferencias significativas, se destaca que los tratamientos de inoculación (T1 y T2) logran obtener valores similares al control del 100 % de fertilización (T4), contribuyendo a la reducción de fertilización de síntesis química al 50 % con estos microorganismos.



**Figura 2.** Altura de plantas de caña a los 8 y 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % de fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 2.** Height of sugarcane plants at 8 and 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate significant statistical differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).

La variable diámetro de tallo se evaluó a los 8 y 15 mdt (Figura 3). No se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, pero los procedimientos de inoculación presentaron mejores respuestas a los tratamientos control. En el caso de la variedad CC 93-7510 en promedio se lograron diámetros superiores a 2,5 cm con *R. irregulare* y para la variedad CC 93-7711 > 3 cm (T1 y T2). Se coincide con Juntahum *et al.* (2021) quienes a pesar de no encontrar un aumento significativo en el diámetro de tallos de caña, destacan al tratamiento de HFMA por presentar un mayor diámetro de caña (> 3,3 cm) respecto al control.



**Figura 3.** Diámetro de tallo de plantas de caña de azúcar a los 8 mdt y 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregulare*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % de fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 3.** Stem diameter of sugarcane plants at 8 mdt and 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregulare*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).

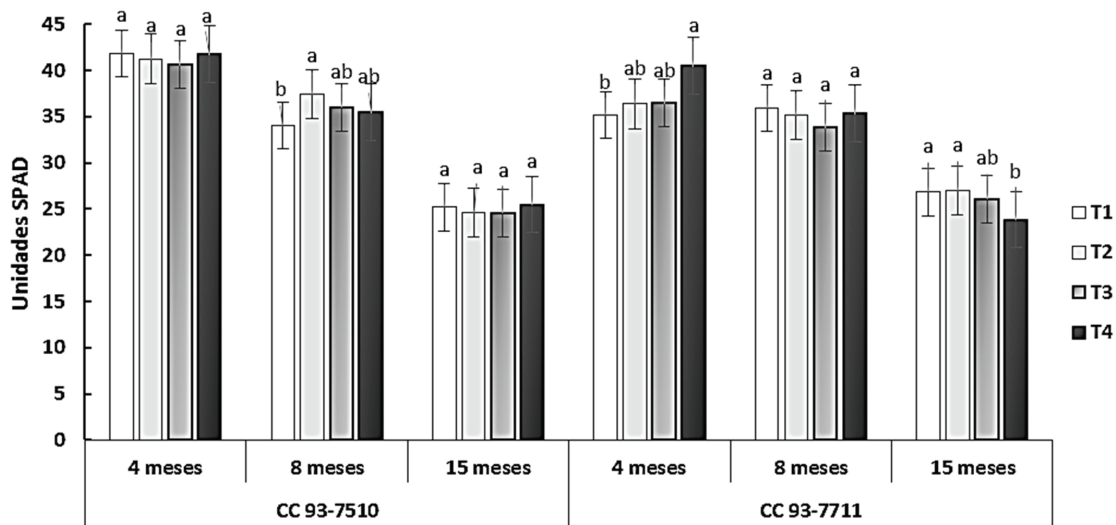
Con respecto a la variable de clorofila total (Figura 4), se presentaron diferencias significativas en la variedad CC 93-7711 a los 15 mdt con un comportamiento superior de los tratamientos inoculados (T1 y T2) respecto a los controles. Para la variedad CC 93-7510 a los 8 mdt se evidencian diferencias significativas entre tratamientos, donde el procedimiento de inoculación T2 registró los valores más altos (37,45 SPAD) respecto al T1 (34,06 SPAD), los tratamientos controles presentaron un comportamiento intermedio (< 36,01 SPAD). En la variedad CC 93-7711 se encontraron diferencias significativas a los 15 mdt en donde los tratamientos de inoculación HFMA (T1 y T2) presentaron valores más altos respecto a los controles, Juntahum *et al.* (2021) también encontraron que los contenidos de la clorofila de las hojas en los tratamientos con HFMA fue un 2 % más alta que en el control, aunque en este estudio no se presentaron diferencias significativas.

Diferentes autores reportan un beneficio por el uso de los HFMA, los cuales permiten obtener una mayor cantidad de tallos por unidad de área (Datta y Kulkarni, 2012; Ehsanipour *et al.*, 2019; Sulistiono *et al.*, 2017; Wilches Ortiz *et al.*, 2019). Para la variable de materia seca total a los 8 y 15 mdt no se presentaron diferencias significativas de acuerdo con el ANOVA. Sin embargo, para el caso de la variedad CC 93-7510 el T1 registró valores superiores a los controles del 50 % (T3) y 100 % de fertilización química (T4) a los 8 y 15 mdt. La variedad CC 93-7711 con el T2 registró valores superiores a los controles (T3 y T4) a los 15 mdt (Figura 5). Juntahum *et al.* (2020) atribuyeron a *Funneliformis mosseae* mejoras en la materia seca de la planta de caña de azúcar en más del 67 % en comparación con la no inoculación, en este estudio para la variedad CC 93-7711 se le atribuye a *A. mellea* un aumento del 12 % y en la variedad CC 93-7510 con *R. irregulare* un aumento del 5 % en la materia seca de la caña de azúcar a los 15 mdt.

### 3.2. Absorción de nutrientes en caña de azúcar

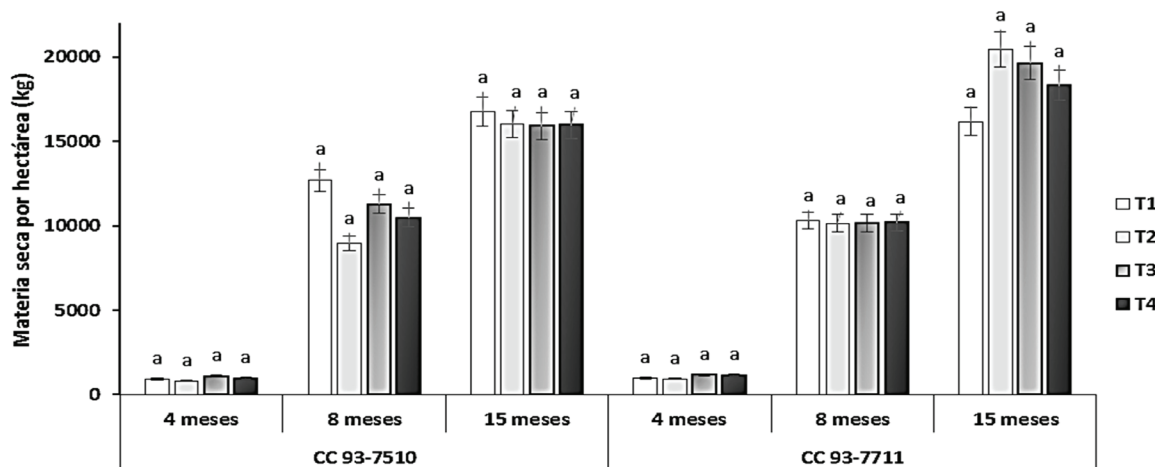
A continuación, se presentan los resultados relacionados con la concentración de nutrientes en el tejido de la planta a los 15 mdt. Según el ANOVA, no se presentaron diferencias estadísticas en la absorción de P (Figura 6b),

K, Mg (Figura 7), Ca, Na (Figura 8) B y Zn (Figura 11) entre tratamientos en las dos variedades. Se presentaron diferencias estadísticas en la variedad CC 93-7711 con *R. irregularis* en los nutrientes N (Figura 6a), S, Fe (Figura 9) y Mn (Figura 10b) y en la variedad CC 93-7510 entre tratamientos en la absorción de Mn con la inoculación de *A. mellea* (Figura 10b). Estos resultados reflejan los beneficios de la inoculación con estos HFMA en la concentración de nutrientes en las plantas de caña para producción de panela. Juntahum *et al.* (2020) atribuyeron a los HFMA un aumento en el contenido de N en plantas de caña de azúcar en comparación con las no inoculadas, coincidiendo con el presente estudio en el que existe un aumento en el contenido de N con *R. irregularis* respecto al control (T4) en la variedad CC 93-7711 (Figura 6a). Los mismos autores encontraron un mayor contenido de P con los HFMA, en este estudio se observó un aumento en el P con respecto al control con las dos cepas de HFMA. Lo cual coincide adicionalmente con Fors *et al.* (2020) en donde la inoculación de *Rhizophagus clarus* aumentó la absorción de P en la caña de azúcar (variedad SP 81-3250).



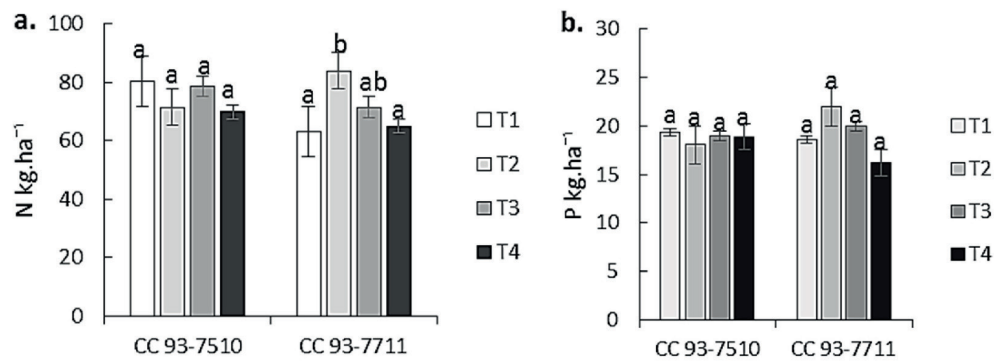
**Figura 4.** Clorofila total en plantas de caña de azúcar a los 8 y 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 4.** Total chlorophyll in sugarcane plants at 8 and 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).



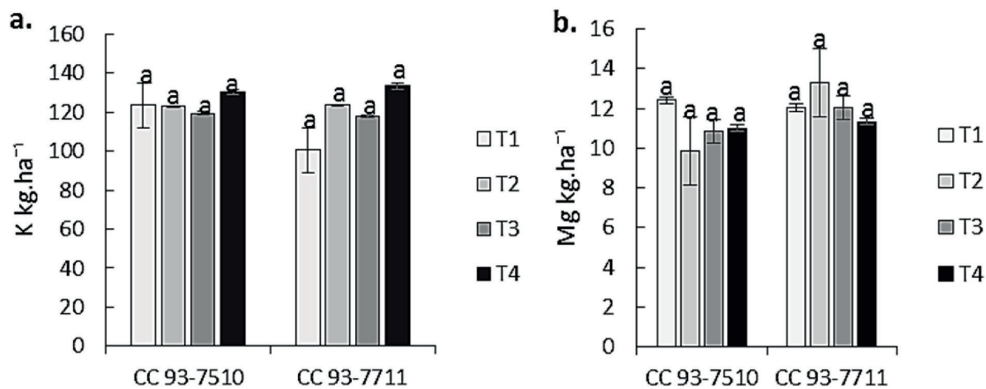
**Figura 5.** Materia seca total por hectárea a los 8 y 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 5.** Total dry matter per hectare at 8 and 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).



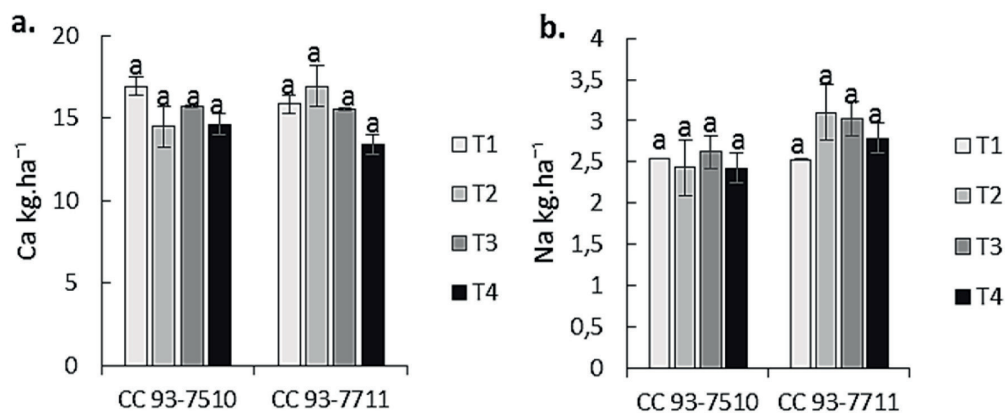
**Figura 6.** Absorción de macronutrientes: a) Nitrógeno y b) Fósforo a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 6.** Macronutrient absorption: a) Nitrogen and b) Phosphorus at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).



**Figura 7.** Absorción de a) K y b) Mg a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

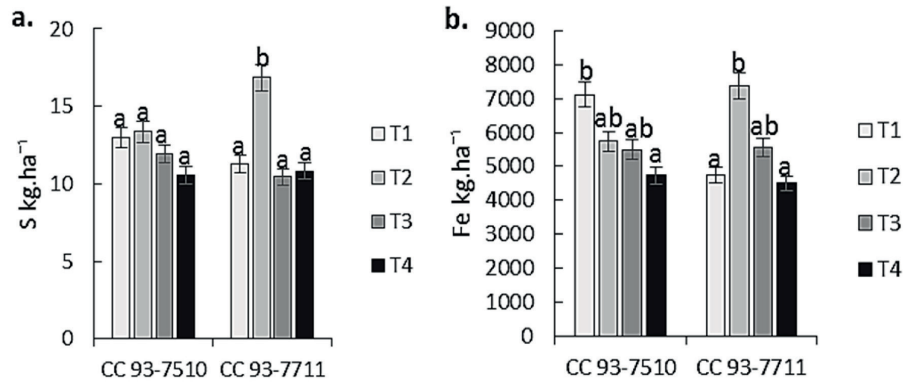
**Figure 7.** Absorption of a) K and b) Mg at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).



**Figura 8.** Absorción de a) Ca y b) Na a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

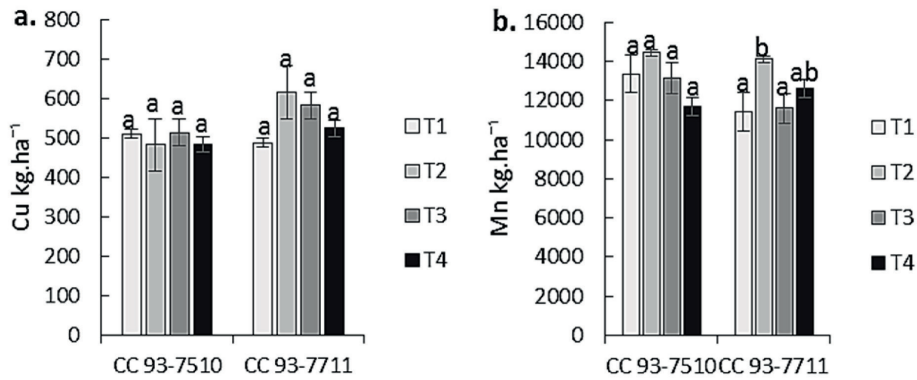
**Figure 8.** Absorption of a) Ca and b) Na at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).





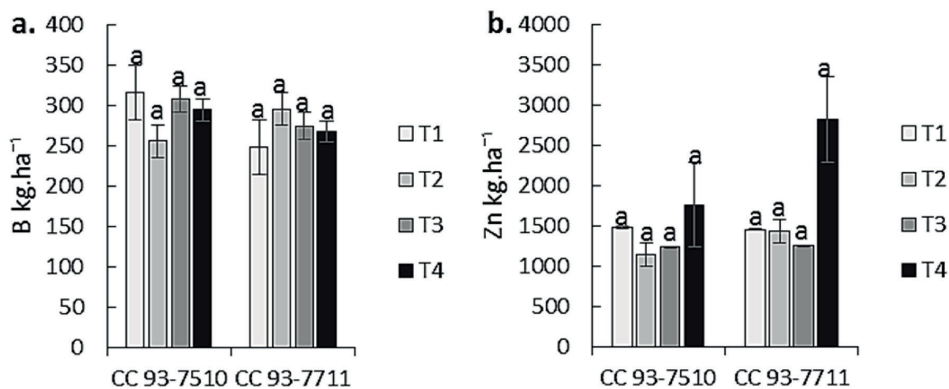
**Figura 9.** Absorción de a) S y b) Fe a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 9.** Absorption of a) S and b) Fe at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).



**Figura 10.** Absorción de a) Cu y b) Mn a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (5 muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 10.** Absorption of a) Cu and b) Mn at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).

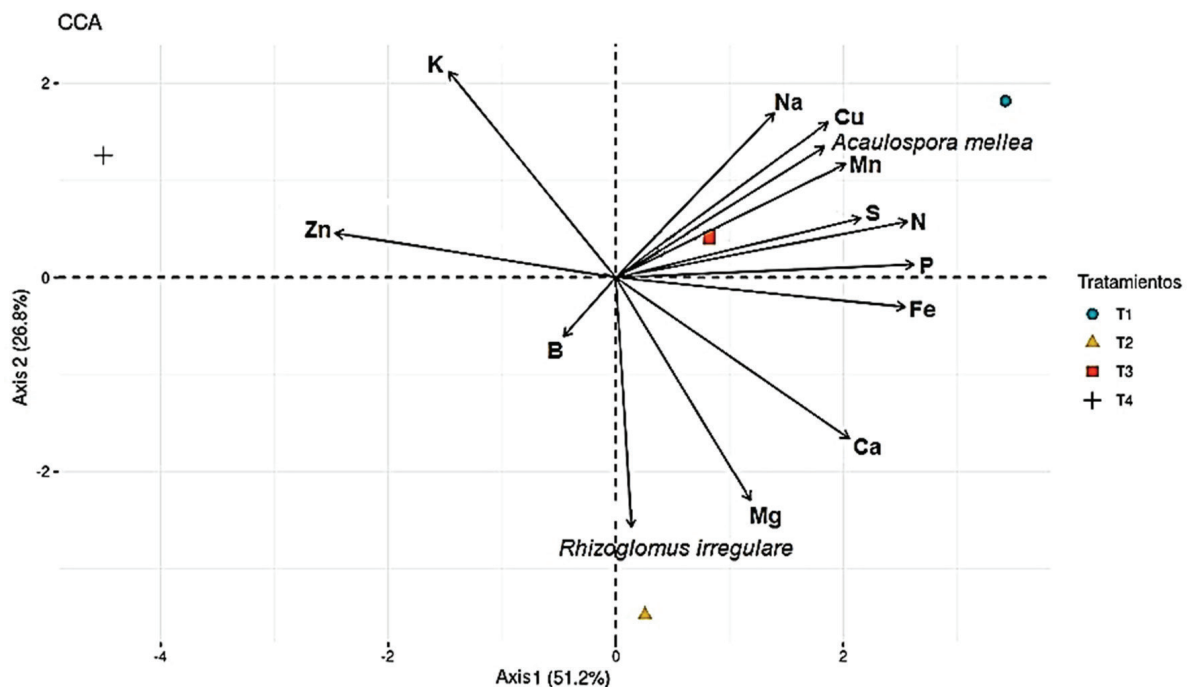


**Figura 11.** Absorción de micronutrientes: a) B y b) Zn a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) entre tratamientos (cinco muestras por tratamiento en tres repeticiones).

**Figure 11.** Absorption of micronutrients: a) B and b) Zn at 15 mat. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization. Means with different letters indicate statistically significant differences (Tukey,  $p \leq 0,05$ ) between treatments (five samples per treatment in three repetitions).

En la Figura 12 se ilustra el análisis de correspondencia Canónica [ACC] con un 78 % de la varianza total, destacándose la correlación presentada entre *A. mellea* y la absorción de sodio, cobre, manganeso, azufre, nitrógeno y fósforo en caña de azúcar, coincidiendo con reportes de la inoculación con HFMA en otras gramíneas, donde encontraron que *Rhizogloium irregulare*, *Rhizogloium fasciculatum* y *Funneliformis mosseae* mejoraron ligeramente los contenidos de N, P, Cu y Mn en plantas de trigo respecto a los controles (Jan *et al.*, 2014). En el presente estudio *Acaulospora mellea* presentó una estrecha correlación con el contenido de P en plantas de caña, en estudios de otras especies, como cacao (Ramírez *et al.*, 2016) se encontró que el uso de HFMA aumenta significativamente el contenido de P en las plantas respecto a las no inoculadas.

En el ACC (Figura 12), la inoculación de *Rhizogloium irregulare* presentó relación con la absorción de Mg, Ca y Fe en caña de azúcar. Jan *et al.* (2014) encontraron que el contenido de Fe fue mayor con la inoculación de *R. irregulare* respecto a otros consorcios de HFMA y los controles, lo cual coincide con este estudio en donde el contenido de Fe en plantas de caña tuvo mayor afinidad con *R. irregulare*. El ACC permitió observar correlación estrecha de la inoculación de los HFMA y el aumento de contenido de nutrientes en plantas de caña, coincidiendo con Juntahum *et al.* (2020) que mencionan la capacidad de los HFMA para la absorción eficiente de nutrientes favoreciendo la acumulación de biomasa en la caña de azúcar.



**Figura 12.** Análisis de correspondencia canónica general de la absorción de nutrientes en caña de azúcar en relación con la inoculación de HFMA. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregulare*, T3: Control sin inoculación, T4: Control 100 % fertilización química.

**Figure 12.** General canonical correspondence analysis of nutrient uptake in sugarcane in relation to AMF inoculation. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregulare*, T3: Control without inoculation, T4: Control 100 % chemical fertilization.

Juntahum *et al.* (2020) atribuyeron a *Funneliformis mosseae* un aumento del 42 % en el contenido de N en plantas de caña de azúcar, en comparación con la no inoculación, en el presente estudio se encontró un 15 % de aumento en el contenido de N con *A. mellea* y un 2 % de incremento con *R. irregulare* respecto al control (T4) en la variedad CC 93-7510 y un 29 % con la inoculación de *R. irregulare* en la variedad CC 93-7711 (Tabla 2). Los mismos autores encontraron un aumento del 47 % del contenido de P con *F. mosseae*, en este estudio en la variedad CC 93-7510 con *A. mellea* se aumentó la absorción de P en un 2 % y en la variedad CC 93-7711 con *R. irregulare* en un 36 % y *A. mellea* con 15 % respecto al control (T4).

En estudios de Rossetto *et al.* (2021) encontraron incrementos del contenido de P, K, Mg, S y Ca en plántulas de caña de azúcar hasta de un 40 % con las cepas *Glomus macrocarpum* y *Claroideogloium etunicatum*, en la Tabla 2 se puede observar incrementos respecto al control (T4) en la variedad 93-7711 del Mg (13 %), S (13 %), Ca (17 %) y Na (2 %) con la inoculación de *A. mellea* y el S un 26 % con *R. irregulare*. En la variedad 93-7711 aumentos del Mg (18 %), Ca (26 %), Na (11 %) y S (56 %) con la inoculación de *R. irregulare* y con *A. mellea* en el Mg (12 %), Ca (18 %) y S (4 %).

Rossetto *et al.* (2021) afirman en su estudio que los HFMA promueven una mayor acumulación de micronutrientes en los tejidos de la caña de azúcar, destacando el aumento de la concentración en tejidos del Mn, Zn, Cu y B favorecido por cepas de *G. macrocarpum* y *C. etunicatum*. Se destaca en la variedad CC 93-7510 incrementos respecto al control (T4) en la concentración del Fe (51 %), Cu (5 %), Mn (14 %) y B (7 %) con la inoculación de *A. mellea* y respuesta a la inoculación de *R. irregulare* en el contenido de Fe (21 %) y Mn (23 %). Para la variedad CC 93-7711 la inoculación de *R. irregulare* presentó incrementos de Fe (64 %), Cu (17 %), Mn (12 %) y B (10 %) y con *A. mellea* en el Fe (5 %) respecto al control (T4) (Tabla 3).

**Tabla 2.** Macronutrientes absorbidos por las variedades y su relación de incremento en porcentaje (↑%) de acuerdo con el tratamiento control del 100 % de fertilización química.

**Table 2.** Macronutrients absorbed by the varieties and their percentage increase ratio (↑%) according to the control treatment of 100 % chemical fertilization.

Variedad	Macronutrientes (kg ha <sup>-1</sup> )													
	N	↑%	P	↑%	K	↑%	Ca	↑%	Mg	↑%	Na	↑%	S	↑%
<b>CC 93-7510</b>														
<i>Acaulospora mellea</i>	80,4	14,9	19,3	2,2	123,5	-5,2	16,9	15,8	12,4	12,9	2,5	4,8	13,0	22,8
<i>Rhizoglyphus irregulare</i>	71,5	2,2	18,1	-4,3	122,8	-5,7	14,5	-1,1	9,9	-10,1	2,4	0,2	13,4	26,6
Control 50%	78,6	12,4	19,0	0,5	119,5	-8,3	15,7	7,6	10,8	-1,3	2,6	8,3	11,9	13,0
Control 100%	69,9	0,0	18,9	0,0	130,3	0,0	14,6	0,0	11,0	0,0	2,4	0,0	10,6	0,0
<b>CC 93-7711</b>														
<i>Acaulospora mellea</i>	63,1	-3,1	18,6	15,0	100,6	-24,6	15,8	18,2	12,0	6,5	2,5	-9,2	11,3	4,1
<i>Rhizoglyphus irregulare</i>	84,0	29,0	22,0	35,9	123,5	-7,5	16,9	26,4	13,3	17,6	3,1	11,1	16,9	55,7
Control 50%	71,5	9,7	20,0	23,6	117,8	-11,8	15,6	16,2	12,0	6,3	3,0	8,6	10,5	-3,3
Control 100%	65,1	0,0	16,2	0,0	133,5	0,0	13,4	0,0	11,3	0,0	2,8	0,0	10,8	0,0

**Tabla 3.** Micronutrientes absorbidos por las variedades y su relación de incremento en porcentaje (↑%) de acuerdo con el tratamiento control del 100 % de fertilización química.

**Table 3.** Micronutrients absorbed by the varieties and their percentage increase ratio (↑%) according to the control treatment of 100 % chemical fertilization.

Variedad	Micronutrientes (kg ha <sup>-1</sup> )									
	Fe	↑%	Cu	↑%	Mn	↑%	B	↑%	Zn	↑%
<b>CC 93-7510</b>										
<i>Acaulospora mellea</i>	7120,00	50,6	509,83	5,5	13377,90	14,3	315,47	7,3	1477,66	-15,9
<i>Rhizoglyphus irregulare</i>	5737,43	21,4	482,41	-0,1	14457,18	23,5	255,03	-13,2	1134,80	-35,4
Control 50%	5497,41	16,3	512,41	6,1	13159,62	12,4	307,12	4,5	1232,99	-29,9
Control 100%	4728,00	0,0	483,12	0,0	11708,39	0,0	293,89	0,0	1757,67	0,0
<b>CC 93-7711</b>										
<i>Acaulospora mellea</i>	4732,92	5,3	486,96	-7,0	11408,48	-9,6	248,20	-7,2	1451,87	-48,4
<i>Rhizoglyphus irregulare</i>	7374,36	64,1	614,82	17,4	14128,48	11,9	294,79	10,3	1425,59	-49,4
Control 50%	5561,32	23,8	580,92	10,9	11597,83	-8,1	274,04	2,5	1245,57	-55,7
Control 100%	4493,92	0,0	523,85	0,0	12623,27	0,0	267,34	0,0	2814,80	0,0

#### 4. Conclusiones

A pesar de que el análisis estadístico no presentó, en la mayoría de los casos, diferencias significativas, es claro que los HFMA ejercen un efecto benéfico sobre el crecimiento de la planta, ya que en muchos casos el/los tratamiento(s) de inoculación registraron valores superiores a los controles con igual fertilización e incluso con la fertilización completa.

Se destacan las diferencias significativas en la absorción de nutrientes presentadas por la inoculación con HFMA con mayores contenidos de N, S, Fe y Mn en las plantas de caña de azúcar CC 93-7510 y CC 93-7711.

A nivel general se presentó una estrecha correlación en la inoculación de *A. mellea* con la absorción de Na, Cu, Mn, S, N y P, y *Rhizoglyphus irregularis* con la absorción de Mg, Fe y Ca en caña de azúcar para panela.

Los resultados obtenidos con este trabajo de investigación permiten concluir que la fertilización biológica con HFMA puede sustituir el 50 % de la fertilización de síntesis, haciéndola más efectiva, mejorando la nutrición en las variedades evaluadas con mayor producción de materia seca.

## Agradecimiento

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR), por la financiación, y a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), por la ejecución del producto: “Generación de recomendaciones agronómicas y nuevas tecnologías en la producción de panela en Colombia”. Convenio TV-16.

## Financiamiento

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR).

## Contribuciones de los autores

- Wilmar Alexander Wilches Ortiz: redacción – borrador original, investigación, curación de datos, análisis formal, visualización, redacción – revisión y edición.
- María Margarita Ramírez Gómez: conceptualización, administración del proyecto, supervisión, investigación, metodología, redacción – revisión y edición.
- Laura María Reyes Méndez: redacción – revisión y edición.
- Urley Adrián Pérez Moncada: redacción – revisión y edición, investigación, administración del proyecto, curación de datos.
- Diana Paola Serralde Ordoñez: redacción – revisión y edición, investigación, administración del proyecto, curación de datos.
- Andrea María Peñaranda Rolón: redacción – revisión y edición, investigación, administración del proyecto, curación de datos.

## Referencias

- Asikin, Y., Kamiya, A., Mizu, M., Takara, K., Tamaki, H., y Wada, K. (2014). Changes in the physicochemical characteristics, including flavour components and Maillard reaction products, of non-centrifugal cane brown sugar during storage. *Food Chemistry*, 149, 170-177. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.10.089>
- Baker, A., Ceasar, S. A., Palmer, A. J., Paterson, J. B., Qi, W., Muench, S. P., y Baldwin, S. A. (2015). Replace, reuse, recycle: Improving the sustainable use of phosphorus by plants. *Journal of Experimental Botany*, 66(12), 3523-3540. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv210>
- Cifuentes, J., Salazar, V. A., Cuellar, M., Castellanos, M. C., Rodríguez, J., Cruz, J. C., y Muñoz-Camargo, C. (2021). Antioxidant and neuroprotective properties of non-centrifugal cane sugar and other sugarcane derivatives in an in vitro induced Parkinson's model. *Antioxidants*, 10(7), 1040. <https://doi.org/10.3390/antiox10071040>
- Datta, P., y Kulkarni, M. (2012). Arbuscular Mycorrhizal Fungal Diversity in Sugarcane Rhizosphere in Relation with Soil Properties. *Notulae Scientia Biologicae*, 4(1), 66-74. <https://doi.org/10.15835/nsb416567>
- Ehsanipour, A., Abbasdokht, H., Gholipour, M., y Abdali Mashhadi, A. (2019). Evaluation of the Effect of Intercropping Sugarcane - Legume on the Quantitative, Qualitative and Physiological Characteristics of Sugarcane. *Crop Physiology Journal*, 11(42), 105-126. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-1190-en.html>



- Fors, R. O., Saggin Júnior, O. J., Carneiro, M. A. C., y Berbara, R. L. L. (2020). Selection of arbuscular mycorrhizal fungi for sugarcane in four soils with the presence of dark septate endophytes. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 42(1), e42477. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42477>
- Gavito, M. E., Jakobsen, I., Mikkelsen, T. N., y Mora, F. (2019). Direct evidence for modulation of photosynthesis by an arbuscular mycorrhiza-induced carbon sink strength. *New Phytologist*, 223(2), 896-907. <https://doi.org/10.1111/nph.15806>
- Gerdemann, J. W., y 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., y 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>
- González, I., y Déjean, S. (2021). *Package CCA: Canonical Correlation Analysis*. R package version 1.2.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/CCA/CCA.pdf>
- Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., y Ceballos-Peñaloza, A. M. (2018). Actualidad del sistema productivo tradicional de panela en Colombia: análisis de mejoras y alternativas tecnológicas. *Ingeniería Y Competitividad*, 20(1), 107-123. <https://doi.org/10.25100/iyc.v20i1.6190>
- Jaffé, W. R. (2012). Health Effects of Non-Centrifugal Sugar (NCS): A Review. *Sugar Tech*, 14(2), 87-94. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0145-1>
- Jan, B., Sharif, M., Khan, F., y Bakht, J. (2014). Effect of arbuscular mycorrhiza fungal inoculation with compost on yield and P uptake of wheat in alkaline calcareous soil. *American Journal of Plant Sciences*, 5(13), 1995-2004. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.513213>
- Juntahum, S., Ekprasert, J., y Boonlue, S. (2022). Efficiency of Arbuscular Mycorrhizal Fungi for the Growth Promotion of Sugarcane Under Pot Conditions. *Sugar Tech*. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01129-z>
- Juntahum, S., Jongrunklang, N., Kaewpradit, W., Ekprasert, J., y Boonlue, S. (2021). Improved Physiological Performances of Sugarcane During Maturation and Ripening Phase by Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Sugar Tech*, 23(2), 336-342. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00887-y>
- Juntahum, S., Jongrunklang, N., Kaewpradit, W., Lumyong, S., y Boonlue, S. (2020). Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Productivity of Sugarcane Under Field Conditions. *Sugar Tech*, 22(3), 451-459. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00784-z>
- Khan, S. R., Sharma, B., Chawla, P. A., y Bhatia, R. (2022). Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES): a Powerful Analytical Technique for Elemental Analysis. *Food Analytical Methods*, 15(3), 666-688. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02148-4>
- Kingston, G. (2014). Mineral nutrition of sugarcane. En P. H. Moore y F. C. Botha (eds.), *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology* (pp. 85-120). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch5>
- Kumalawati, Z., Musa, Y., Amin, N., Asrul, L., y Ridwan, I. (2014). Exploration of arbuscular mycorrhizal fungi from sugarcane rhizosphere in South Sulawesi. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3(1), 201-203. <http://www.ijstr.org/paper-references.php?ref=IJSTR-1213-7930>
- Latimer, G. W. (ed.). (2016). *Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists International* (20<sup>th</sup> ed.). AOAC International. [https://www.techstreet.com/standards/official-methods-of-analysis-of-aoac-international-20th-edition-2016?product\\_id=1937367](https://www.techstreet.com/standards/official-methods-of-analysis-of-aoac-international-20th-edition-2016?product_id=1937367)
- Manrique Estupiñán, R. (2000). Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar para panela. En O. H. Parra P., y H. J. Páez Mozo, *Manual de caña de azúcar para la elaboración de panela* (2<sup>a</sup> ed.) (pp. 83-96). Corporación colombiana de investigación agropecuaria [CORPOICA] y Fondo Nacional de la Panela [FEDEPANELA]. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18504>
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura [FAO]. (1994). *Definition and Classification of Commodities—Sugar Crops and Sweeteners and Derived Products*. <https://www.fao.org/waicent/faoinfo/economic/faodef/fdef03e.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura [FAO]. (2018). *Base de datos balance alimentario*. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>

- Pontes, J. S., Oehl, F., Marinho, F., Coyne, D., Silva, D. K. A., Yano-Melo, A. M., y Maia, L. C. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazil's Caatinga and experimental agroecosystems. *Biotropica*, 49(3), 413-427. <https://doi.org/10.1111/btp.12436>
- R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Ramírez, J. G., Osorno, L., y Osorio, N. W. (2016). Presence of mycorrhizal fungi and a fluorescent *Pseudomonas* sp. in the rhizosphere of cacao in two agroecosystems and their effects on cacao seedling growth. *Agronomía Colombiana*, 34(3), 385-392. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.57950>
- Rossetto, L., Fonseca Pierangeli, G. M., Kuramae, E. E., Xavier, M. A., Aparecido, M., Cipriano, P., Dias Da Silveira, A. P., Kuramae, G. M. F., Xavier, E. E., Cipriano, M. A., y Silveira, M. A. P. (2021). Sugarcane pre-sprouted seedlings produced with beneficial bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi. *Bragantia*, 80, e2721. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200276>
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S., Bonini, P., y Colla, G. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002>
- Smith, S. E., y Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3<sup>rd</sup> ed.). Academic Press. <https://www.agrifs.ir/sites/default/files/Sally%20E.%20Smith,%20David%20J.%20Read%20Mycorrhizal%20Symbiosis%20%202008.pdf>
- Sulistiono, W., Taryono, T., Yudono, P., e Irham, I. (2017). Early-arbuscular mycorrhizal fungi-application improved physiological performances of sugarcane seedling and further growth in the dry land. *Journal of Agricultural Science*, 9(4), 95-108. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n4p95>
- Sun, Z., Song, J., Xin, X., Xie, X., y Zhao, B. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungal 14-3-3 proteins are involved in arbuscule formation and responses to abiotic stresses during AM symbiosis. *Frontiers in Microbiology*, 9, 91. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00091>
- Walan, P., Davidsson, S., Johansson, S., y Höök, M. (2014). Phosphate rock production and depletion: Regional disaggregated modeling and global implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 93, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.011>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-98141-3>
- Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolon, A. M., y Ramírez, L. (2019). Association of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) with sugarcane plants (*Saccharum officinarum*) for panela production in Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 175-184. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.481>