

**Uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares en el cultivo de caña de azúcar
para el mejoramiento de la calidad y rendimiento de panela en Suaita Santander**

Wilmar Alexander Wilches Ortiz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Maestría en Biotecnología Alimentaria

2022

**Uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares en el cultivo de caña de azúcar
para el mejoramiento de la calidad y rendimiento de panela en Suaita Santander**

Wilmar Alexander Wilches Ortiz

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Biotecnología Alimentaria

Modalidad

Proyecto de Investigación

Director (a):

PhD Laura María Reyes Méndez

Codirector (a):

PhD Senior María Margarita Ramírez Gómez

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Maestría en Biotecnología Alimentaria

2022

Declaración de derechos de propiedad intelectual

Los autores de la presente propuesta manifestamos que conocemos el contenido del Acuerdo 06 de 2008, Estatuto de Propiedad Intelectual de la UNAD, Artículo 39 referente a la cesión voluntaria y libre de los derechos de propiedad intelectual de los productos generados a partir de la presente propuesta. Asimismo, conocemos el contenido del Artículo 40 del mismo Acuerdo, relacionado con la autorización de uso del trabajo para fines de consulta y mención en los catálogos bibliográficos de la UNAD.

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a:

Mis padres, hermanos y amigos por siempre confiar en mí, por su apoyo y animo en cada instante de mi vida.

Mis compañeras de estudio por el trabajo en equipo y dedicación en cada etapa académica y personal.

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia “Fuente y titular de la información”. Por brindarme los escenarios de aprendizaje e investigación relacionados al sistema productivo de la caña panelera y su asociación a los hongos formadores de micorrizas arbusculares. Por permitirme hacer uso de la información y datos incluidos en este trabajo.

La Investigadora PhD Senior de Agrosavia María Margarita Ramírez Gómez por sus enseñanzas y oportunidades brindadas que fortalecieron mi desempeño investigativo y el del presente trabajo.

La Investigadora PhD Laura María Reyes Méndez por su compromiso, dedicación y orientación en mi trayectoria académica, así como su orientación que permitió fortalecer el presente trabajo.

La educación es el pasaporte hacia el futuro, el mañana pertenece a aquellos que se preparan para él en el día de hoy.

Malcolm X.

Si hiciésemos todas las cosas de las que somos capaces, nos asombraríamos.

Thomas Edison.

Resumen

En Colombia el azúcar no centrifugado, conocido como panela es un alimento ancestral extraído de la caña de azúcar mediante métodos tradicionales sin refinar. Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) ayudan al intercambio y movilidad de nutrientes al asociarse con plantas, mejorando la calidad y rendimiento en diferentes sistemas productivos. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación con HFMA en el cultivo de la caña de azúcar sobre el rendimiento y la calidad en panela. El estudio se desarrolló en la localidad de Suaita-Santander, en donde se estableció un diseño completo al azar, con tres repeticiones y cuatro tratamientos (T1: *Acaulospora mellea*, T2: *Rhizophagus irregularis*, T3: Control 50% y T4: Control 100% de fertilización) en dos variedades de caña de azúcar (CC 93-7711 y CC 93-7510). Las variables analizadas fueron altura de la planta, diámetro del tallo, contenido de clorofila, índice de madurez, absorción de nutrientes, materia seca, toneladas de caña por hectárea (TCH), toneladas de panela por hectárea (TPH) y conversión a panela, adicionalmente en jugos y panela se determinaron azúcares reductores, sólidos totales, pH, humedad, sacarosa y fósforo soluble. Se presentaron diferencias significativas en la variedad CC93-7711 en el índice de madurez y la absorción de N, S, Fe, y Mn con el T2, contenido de clorofila a los 15 meses después de trasplante (mdt) con T1 y T2, y mayor contenido de azúcares reductores en panela con el T1, en las demás variables se observó un beneficio de la inoculación con respecto a los controles, siendo T2 el tratamiento con los mayores valores en TCH; y T1 con mayores valores de conversión a panela, azúcares reductores, fósforo soluble y sólidos totales. En la variedad 93-7510 se encontró diferencias significativas en la altura de la planta, absorción de Mn y fósforo soluble en jugos con el T1 y el contenido de clorofila en la caña a los 8 mdt y la humedad en panela con el T2. En las demás variables se destaca que la inoculación con *A. mellea*

obtuvo valores más altos de índice de madurez, TCH, TPH, pureza y fósforo soluble y con *R. irregularis* mayor valor en sólidos totales solubles y azúcares reductores. Las correlaciones a nivel general demostraron interacción de *A. mellea* con la humedad y azúcares reductores, y de *R. irregularis* con los sólidos totales, pureza y fósforo soluble de panela. En la variedad CC 93-7711 se destaca que *A. mellea* interactúa con la humedad y temperatura, *R. irregularis* con los sólidos totales. En la variedad CC 93-7510 se evidenció que *A. mellea* interactúa con la humedad, sólidos totales y pH, *R. irregularis* con fósforo soluble, pureza, sacarosa y temperatura. Se encontró interacción de *R. irregularis* y *A. mellea* con la calidad y rendimiento en panela, obteniéndose resultados prometedores a nuevos estudios de estos microorganismos para potencializar la sostenibilidad y competitividad de la caña panelera.

Palabras claves: azúcar no centrifugado, caña panelera, *Acaulospora mellea*, *Rhizophagus irregularis*.

Abstract

In Colombia, non-centrifuged sugar, known as panela, is an ancestral food extracted from sugarcane using traditional unrefined methods. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) help the exchange and mobility of nutrients by associating with plants, improving quality and yield in different production systems. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of AMF inoculation in sugarcane cultivation on panela yield and quality. The study was carried out in the town of Suaita-Santander, where a completely randomized design was established, with three repetitions and four treatments (T1: *Acaulospora mellea*, T2: *Rhizophagus irregularis*, T3: Control 50% and T4: Control 100% fertilization) in two varieties of sugarcane (CC 93-7711 and CC 93-7510). The variables were plant height, stem diameter, chlorophyll content, maturity index, nutrient absorption, dry matter, tons of cane per hectare (TCH), tons of panela per hectare (TPH) and conversion to panela, additionally in juices and panela, reducing sugars, total solids, pH, humidity, sucrose, and soluble phosphorus were determined. Significant differences ($P > 0.05$) were presented in the variety CC93-7711 in the maturity index and the absorption of N, S, Fe, and Mn with T2, chlorophyll content at 15 months after transplantation (mat) with T1 and T2, and higher content of reducing sugars in panela with T1, in the other variables a benefit of the inoculation was observed with respect to the controls, being T2 the treatment with the highest values in TCH; and T1 with higher values of conversion to panela, reducing sugars, soluble phosphorus and total solids. In variety 93-7510, significant differences were found in plant height, absorption of Mn and soluble phosphorus in juices with T1 and chlorophyll content in cane at 8 mat and moisture in panela with the T2. In the other variables, it stands out that the inoculation with *A. mellea* obtained higher values of maturity index, TCH, TPH, purity and soluble phosphorus and with *R. irregularis* higher value in total soluble solids and reducing

sugars. The correlations at a general level showed interaction of *A. mellea* with humidity and reducing sugars, and of *R. irregularis* with the total solids, purity, and soluble phosphorus of panela. In the variety CC 93-7711, it stands out that *A. mellea* interacts with humidity and temperature, and *R. irregularis* with total solids. In the CC 93-7510 variety, it was shown that *A. mellea* interacts with humidity, total solids and pH, *R. irregularis* with soluble phosphorus, purity, sucrose, and temperature. Interaction of *R. irregularis* and *A. mellea* with panela quality and yield was found, obtaining promising results for new studies of these microorganisms to enhance the sustainability and competitiveness of sugarcane for panela.

Keywords: non-centrifuged sugar, sugarcane for panela, *Acaulospora mellea*, *Rhizophagus irregularis*.

Tabla de Contenido

Lista de figuras.....	12
Lista de tablas	14
Lista de ecuaciones	15
Lista de símbolos y abreviaturas.....	16
Introducción	18
Planteamiento del problema.....	20
Justificación	22
Objetivos	23
Objetivo general.....	23
Objetivos específicos	23
Marco conceptual y teórico.....	24
La caña de azúcar.....	24
Variedades de caña de azúcar	24
Panela.....	26
Contenido nutricional de la panela	26
Producción de Panela en la región	28
Normatividad Colombiana en la producción de panela.....	29
Biotecnología en el mejoramiento de la panela	30
Hongos formadores de micorrizas arbusculares	31
Metodología	322
Fase 1. Establecimiento y seguimientos agronómicos de caña de azúcar.	32
Localización del experimento	32
Material vegetal	32
Trasplante en vivero e Inoculación de microorganismos	32
Diseño experimental	33
Manejo agronómico del cultivo	34
Variables de seguimiento agronómico.....	366
Fase 2. Producción de panela y jugos.	388
Obtención de panela y sus rendimientos.....	388
Caracterización fisicoquímica de jugos y panela.....	411
Determinación de pH en Jugo y panela.	411
Determinación de la concentración de azúcares totales en Jugo y Panela (°Brix)	411

Determinación de porcentaje de Sacarosa en Jugo y panela.....	422
Determinación de porcentaje de Azúcares Reductores en jugo y panela:	433
Determinación de porcentaje de humedad en panela.....	444
Determinación de porcentaje de pureza en jugos y panela.	455
Análisis estadísticos	455
Resultados y discusión.....	46
Fase 1. Establecimiento y seguimientos agronómicos de caña de azúcar.	46
Resultados de Nutrientes en caña de azúcar	51
Fase 2. Producción de panela y jugos.	566
Resultados producción de panela.....	566
Parámetros Fisicoquímicos en Panela.....	59
Correlaciones de Pearson	622
Análisis de correspondencia canónica	655
Conclusiones	70
Recomendaciones	70
Referencias bibliográficas.....	71

Lista de figuras

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

Figura 2. Altura de plantas de caña a los 4, 8 y 15 mdt.

Figura 3. Diámetro de tallo de plantas de caña a los 8 mdt y 15 mdt.

Figura 4. Clorofila total en plantas de caña a los 4, 8 y 15 mdt.

Figura 5. Índice de madurez de caña de azúcar a los 15 mdt.

Figura 6. Materia seca total por hectárea a los 4, 8 y 15 mdt.

Figura 7. Toneladas de caña por hectárea a los 15 mdt.

Figura 8. Absorción de macronutrientes a) Nitrógeno y b) Fósforo a los 15 mdt.

Figura 9. Absorción de a) Potasio y b) Magnesio a los 15 mdt.

Figura 10. Absorción de a) Calcio y b) Sodio a los 15 mdt.

Figura 11. Absorción de a) Azufre y b) Hierro a los 15 mdt.

Figura 12. Absorción de a) Cobre y b) Manganeso a los 15 mdt.

Figura 13. Absorción de Micronutrientes a) Boro y b) Zinc a los 15 mdt.

Figura 14. Análisis de correspondencia canónica general de la absorción de nutrientes en caña de azúcar en relación con la inoculación de HFMA.

Figura 15. Producción de toneladas de panela por hectárea en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510.

Figura 16. Características fisicoquímicas en jugos variedad CC 93-7510.

Figura 17. Características fisicoquímicas de panela variedad CC 93-7711.

Figura 18. Características fisicoquímicas de panela variedad CC 93-7510.

Figura 19. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar para panela.

Figura 20. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar variedad CC 93-7510.

Figura 21. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar variedad CC 93-7711.

Figura 22. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar en relación con la inoculación de HFMA.

Figura 23. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en la variedad de caña de azúcar CC 93-7711 en relación con la inoculación de HFMA.

Figura 24. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en la variedad de caña de azúcar CC 93-7510 en relación con la inoculación de HFMA.

Lista de tablas

Tabla 1. Composición promedio de la panela.

Tabla 2. Características de producción nacional de panela en Colombia.

Tabla 3. Valoración de parámetros fisicoquímicos de calidad en panela sólida y jugos.

Tabla 4. Tratamientos en la localidad de Suaita.

Tabla 5. Esquema de fertilización empleado en los diferentes tratamientos.

Tabla 6. Características fisicoquímicas en jugos de las variedades CC93-7510 y CC 93-7711.

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Porcentaje de materia seca.

Ecuación 2. Cantidad de materia seca.

Ecuación 3. Absorción de nutrientes.

Ecuación 4. Toneladas de caña por hectárea (TCH).

Ecuación 5. Caña requerida para 4 Kg de jugo.

Ecuación 6. Porcentaje de conversión de caña a panela.

Ecuación 7. Toneladas de panela por hectárea (TPH).

Ecuación 8. Fórmula de Echmitz's para jugos.

Ecuación 9. Fórmula de Echmitz's para panela.

Ecuación 10. Porcentaje de azúcares reductores en jugos y panela.

Ecuación 11. Porcentaje de humedad en panela.

Ecuación 12. Porcentaje de pureza en jugos y panela.

Lista de símbolos y abreviaturas

AGROSAVIA: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

AR: Azúcares reductores.

Bx ext: Brix extracto.

CCP: Conversión de caña a panela.

CENICAÑA: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

CN: Contenido de Nutrientes.

CR: Caña requerida.

DCA: Diseño completo al azar.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FF: Factor Fehling.

FD: Factor de dilución.

HFMA: Hongos formadores de micorrizas arbusculares.

JO: Jugo Obtenido.

Lp: Lectura polarimétrica.

MFr: Materia fresca.

mdt: Meses después de trasplante.

MINSALUD: Ministerio de Salud y Protección Social.

MS. Masa Seca.

NCS: Azúcar No Centrifugado

PC: Peso caja.

PDC: Peso de la caña.

PF: Peso final.

PFr: Peso fresco.

PI: Peso inicial.

PO: Panela obtenida.

TCH: Toneladas de caña por hectárea.

TPH: Toneladas de panela por hectárea.

UE. Unidad experimental.

Introducción

El azúcar no centrifugado (Non-Centrifuged Sugar - NCS, por sus siglas en inglés), es el término técnico (FAO, 1994) que se le da al azúcar sin refinar típico que se produce por la deshidratación del jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) sin centrifugar (Ge et al., 2021; Weerawatanakorn et al., 2021). El azúcar no centrifugado está disponible en muchos países con diferentes nombres locales, incluidos panela (Bolivia, Colombia, Ecuador, Guatemala, Panamá), piloncillo (México), papelón (Venezuela), chancaca (Chile, Perú) rapadura (Brasil, Argentina), jaggery (India), Kokuto (Japón) y Gula Melaka (Malasia) (Asikin et al., 2014; Jaffé, 2012).

Colombia es el segundo productor de panela (NCS) en el mundo después de la India, el área anual de caña para la producción reportado para el 2020 fue de 192.863 ha con un rendimiento de 6.5 t ha⁻¹ (MinAgricultura, 2021). La panela presenta altos contenidos de sacarosa que consisten en microcristales anhidros de forma irregular rodeados de varios constituyentes como azúcares reductores, minerales, vitaminas, aminoácidos y otras trazas (Velásquez et al., 2019), siendo la sacarosa el componente más importante (65–85 %), seguido de azúcares reductores (10–15 %), agua (3–10 %) y materia insoluble como grasas, proteínas, minerales, hierro y fósforo (<1 %) (Rupe, 2007). Estos componentes son de gran importancia para los requerimientos de calidad en el alimento y se rigen en el país de acuerdo con la norma colombiana (Res 779-2006), en donde se exigen parámetros de calidad en panela como: sacarosa, pureza, azúcares reductores, fosfatos, pH, humedad y sólidos totales solubles (MinSalud, 2006).

La principal región panelera está ubicada en la Hoya del Río Suarez; sin embargo, falta aún consolidar una producción rentable, competitiva y sostenible (González Chavarro et

al., 2018) que logre mejorar el rendimiento y la calidad de la panela, es aquí donde el uso de microorganismos benéficos como los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) pueden inferir, debido al efecto que ejercen al asociarse con algunas plantas mejorando el intercambio y movilidad de nutrientes, además de su capacidad para potencializar los sistemas agrícolas. Diferentes estudios en caña de azúcar han identificado beneficios de la asociación de los HFMA obteniendo mejoría en el manejo nutricional, el estrés hídrico (Datta & Kulkarni, 2012), la fisiología y el rendimiento de la planta (Sulistiono et al., 2017; Wilches Ortiz et al., 2019). Adicionalmente, se ha destacado el impacto de la simbiosis de los HFMA en la calidad de la producción de cultivos, abordando desde la perspectiva del valor nutricional, las cualidades organolépticas de los alimentos (p. ej., aroma, sabor), características fisicoquímicas y los metabolitos secundarios en relación con sus efectos bioactivos en la salud humana o su valor industrial (Noceto et al., 2021). Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación con HFMA en el cultivo de la caña de azúcar sobre el rendimiento y la calidad en panela.

Planteamiento del problema

Los sistemas de producción en caña de azúcar de pequeños productores se caracterizan por procesos convencionales, con bajos niveles de adopción de herramientas biotecnológicas, lo que limita su productividad y sostenibilidad. La panela es un alimento ancestral extraído de la caña de azúcar mediante métodos tradicionales sin centrifugar, sus elementos constitutivos como sacarosa y glucosa aportan carbohidratos, minerales, vitaminas, proteínas y agua. Cabe resaltar que en el grupo de alimentos prioritarios de Colombia del Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional 2012 – 2019 la panela se priorizó en la categoría de azúcares (MinAgricultura. et al., 2012). Como producto desarrolla un rol fundamental en la seguridad alimentaria, al considerarse un alimento básico de uso energético incluido en la dieta alimentaria de las familias colombianas, incluidos niños, adultos y madres lactantes, 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 representó un consumo promedio per cápita anual de 24,8 kg, con aportes de 0,68 proteínas (g / cápita / día) y cerca de 23 kilocalorías/persona/día, que representaron cerca del 8% al consumo calórico de la población (FAO, 2018). Su uso básico en la alimentación de miles de personas en el país implica unos requerimientos mínimos de calidad y un aseguramiento de su productividad. Parámetros como la sacarosa, pureza, azúcares reductores, fosfatos, pH, humedad y sólidos totales solubles influyen directamente en la calidad y son de estricto cumplimiento en la norma colombiana (Res 779-2006), es aquí donde el uso de microorganismos benéficos como los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) usados desde el eslabón primario del alimento pueden inferir directamente en las características fisicoquímicas de la panela y sus rendimientos. Por tanto, la presente

investigación se plantea la hipótesis de que la incorporación de HFMA en el cultivo de caña de azúcar mejorará la calidad y el rendimiento en panela.

Justificación

En Colombia la producción de panela es considerada como la segunda agroindustria de importancia social del país después del café; es un alimento ancestral que a pesar de su antigüedad continúa cumpliendo importantes funciones en la seguridad alimentaria de los colombianos, cumpliendo un rol fundamental en la alimentación de las familias de escasos recursos de los estratos 1 y 2, siendo la mayor fuente calórica de infantes y familias campesinas (ICBF. & FAO., 2020; MinAgricultura, 2021). Se ha considerado a la producción de panela como una de las agroindustrias rurales en las que participan más de 350.000 familias generando 287.000 empleos directos, que equivalen a 45 millones de jornales al año, ocupando el 12% de la población rural económicamente activa (MinAgricultura, 2021).

El sistema de producción de la caña de azúcar para la producción de panela se caracteriza por ser un sistema tradicional con poca tecnificación en sus procesos. Para lograr contribuir a los sistemas agroalimentarios, la producción agrícola tradicional requiere de la investigación y aplicación de herramientas biotecnológicas que permitan la disponibilidad y acceso a los alimentos, así como el mejoramiento en la calidad de estos. El uso de microorganismos favorece los sistemas agroalimentarios haciéndolos más eficientes y sostenibles en el tiempo, la incorporación de los HFMA han reportado mejoras en el rendimiento de los cultivos así como una mejora a factores de estrés en la planta y mejoramiento del uso del suelo (Chavarria et al., 2018; Gianinazzi et al., 2010; Gupta & Germida, 2015), se podría además atribuir un mejoramiento en la calidad de los alimentos debido a la incorporación de microorganismos en los sistemas de producción convencionales, de allí la necesidad de la investigación de los atributos de mejora en la calidad de la panela a través de estos microorganismos incorporados en el cultivo de la caña de azúcar respondiendo a las demandas del mercado en donde cada vez se requiere una mayor calidad e inocuidad del alimento.

Objetivos

Objetivo general:

Evaluar el efecto de la inoculación con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) en el cultivo de la caña de azúcar sobre el rendimiento y la calidad en panela.

Objetivos específicos:

Evaluar la respuesta productiva a la inoculación con HFMA de los cultivos de caña de azúcar en condiciones de agricultor.

Analizar el rendimiento y calidad en panela obtenida de cultivos de caña de azúcar inoculados con HFMA.

Correlacionar la inoculación de HFMA con los parámetros de calidad en panela.

Marco conceptual y teórico

La caña de azúcar

(*Saccharum officinarum* L.), es una hierba perenne de la familia Poaceae, cultivada principalmente por su jugo del que se procesa el azúcar. La mayor parte de la caña de azúcar del mundo se cultiva en áreas tropicales y subtropicales. La planta también se cultiva para la producción de biocombustible, especialmente en Brasil, ya que las cañas se pueden usar directamente para producir alcohol etílico (etanol) (Chinnadurai, 2017). Los subproductos del procesamiento de la caña de azúcar, a saber, la paja y el bagazo (fibras de caña), se pueden utilizar para producir etanol celulósico, un biocombustible de segunda generación (De Almeida & Colombo, 2021). Otros productos de la caña de azúcar son la melaza, el ron y la cachaza (un alcohol brasileño), y la planta en sí se puede utilizar como paja y como forraje para el ganado (Chinnadurai, 2017).

La planta de caña de azúcar produce una serie de tallos que alcanzan de 3 a 7 metros de altura y tienen hojas largas en forma de espada. Los tallos se componen de muchos segmentos y en cada articulación hay una yema. La maduración de la caña se da cuando un punto de crecimiento en el extremo superior del tallo se convierte en una flecha delgada con una borla de flores diminutas (Endres et al., 2018).

Variedades de caña de azúcar

Las variedades CC 93-7711 (Pierna Bella) (Agrosavia, 2021a) y CC 93-7510 (Vende Finca) (Agrosavia, 2021b) fueron introducidas por primera vez en la región geográfica conocida

como hoya del río Suárez (HRS) (Santander y Boyacá) en el año 2008. En este año se realizó un proceso de selección entre 80 materiales genéticos evaluados, en donde las dos variedades destacaron en la producción de caña, panela y rendimiento en panela conjuntamente a otros tres materiales (RD 75-11, CC 91-1555, CC 93-714), que formaron parte de las pruebas regionales de evaluación agroindustrial para su respectiva caracterización y registro (Agrosavia, 2021a, 2021b; Insuasty Burbano et al., 2018; Ramirez Duran, 2014). Estos materiales tuvieron relevancia en las regiones de Santander, Cundinamarca, Antioquia y Tolima, por sus características fitosanitarias y de producción de caña y panela, lo cual hace que sea recomendable para ambientes secos o semisecos de estas regiones paneleras del país (Insuasty Burbano et al., 2018). En el 2014 en evaluación de 10 variedades de la región de HRS estas dos variedades (CC 93-7510 y CC 93-7711) vuelven a destacar en producción de 20,2 y 18 toneladas de caña por hectárea y 2,2 y 2,5 toneladas de panela por hectárea, respectivamente, superando los rendimientos alcanzados por la variedad RD 75-11 empleada como control (Ramírez Durán et al., 2014).

La variedad CC 93-7711, tiene buena adaptabilidad a suelos de baja fertilidad, alta capacidad de macollamiento, eficiente en el uso del agua, material semi tardío (madurez fisiológica antes de los 18 meses), resistente a roya café (*Puccinia melanocephala*), carbón (*Sporisorium scitamineum*) y virus de la hoja amarilla (Género *Polerovirus* y familia *Luteoviridae*), tolerante a daños foliares y bajo índice de daño por *Diatraea* sp (11%), además de una producción 270,59 TCH y 30,8 TPH (Ji, 2013; Viveros Valens, 2011).

La variedad CC 93-7510, se caracteriza por tener buena adaptabilidad a suelos de baja fertilidad, alta capacidad de macollamiento, precocidad (según índice de madurez (IDM) antes de los 16,1 meses), resistente a roya café (*Puccinia melanocephala*), carbón (*Sporisorium*

scitamineum) y virus de la hoja amarilla (Género *Polerovirus* y familia Luteoviridae) y hojas sanas fitosanitariamente, bajo índice de daño por *Diatraea* sp (4,35%), producción 208,8 TCH y 26,5 TPH (Ramírez Durán et al., 2014).

Panela

La panela también denominada azúcar no centrifugado (ANC) por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (ONUAA, o más conocida como FAO por sus siglas en inglés), es un producto sólido sin refinar obtenido por evaporación del jugo de caña de azúcar (FAO, 1994). Se ha consumido tradicionalmente como edulcorante en la mayoría de las regiones productoras de caña de azúcar del mundo, donde se le conoce con muchos nombres diferentes, los más comunes son jaggery y gur (sur de Asia), panela (algunos países de América Latina), chancaca (Perú), Piloncillo (México) moscovado (Filipinas), raspadura y azúcar mascavo (Brasil) y kokuto (Japón) (Asikin et al., 2014; Jaffé, 2012).

Contenido nutricional de la panela

En la tabla 1 se mencionan los principales componentes nutricionales de la panela en bloque de acuerdo con estudios de AGROSAVIA antes CORPOICA (2004).

Tabla 1. Composición nutricional promedio de la panela. Tomado de CORPOICA (2004).

Componentes	Promedio
Humedad (g)	7,0
Carbohidratos (g/100g)	88,3
- Sacarosa	79,4
- Azúcar invertido	8,5
Sustancias nitrogenadas (g/100g)	
- Nitrógeno total	0,08

- Proteína	0,46
Grasa (g/100g)	0,21
Fibra (g/100g)	0,24
Ceniza (g/100g)	1,29
Minerales (mg/100g)	
- Potasio	116,7
- Calcio	172,8
- Magnesio	61,7
- Fósforo	60,4
- Sodio	56,0
- Hierro	5,3
- Manganeso	1,2
- Zinc	1,5
- Flúor	5,7
- Cobre	0,4

El azúcar no centrifugado (ANC) es esencialmente jugo de caña de azúcar seco. El jugo se extrae de la caña, se limpia, se clarifica y luego se concentra por evaporación de su contenido de agua. Dependiendo del proceso de fabricación, se presenta en forma sólida, conocida como azúcar en bloque o en forma granulada. Dado el alto contenido de sacarosa del jugo de caña, son, por lo tanto, los cristales de sacarosa mezclados con melaza, los constituyentes adicionales del jugo de caña. Jaffé (2015) menciona que la Organización Mundial de Aduanas (OMA) (2010) se refiere a la panela de la siguiente manera: “Producto que contiene únicamente microcristales anédricos naturales, de forma irregular, no visibles a simple vista, que están rodeados de residuos de melaza y otros constituyentes de la caña de azúcar”. Estos componentes adicionales son azúcares reductores (glucosa y fructosa), minerales, vitaminas, ácidos orgánicos, aminoácidos, azúcares complejos o raros y otras sustancias, muchas probablemente aún desconocidas.

La sacarosa es el componente más importante de la panela con un 76,55 y 89,48%, seguido de azúcares reductores (3,69 a 10,5%) y agua (1,5 a 15,8%) (Rupe, 2007). El rango relativamente grande de contenido de humedad se debe a las diferencias en las condiciones del proceso de fabricación de este producto principalmente artesanal. Menciona que el contenido de minerales (cenizas) es relativamente alto (0,3–3,6%), el contenido de proteínas oscila entre el 0,37 y el 1,7% y las grasas entre el 0 y el 0,1% (Jaffé, 2015; Lee et al., 2018). La diferencia básica entre ANC y azúcar refinada es la presencia en el primero de azúcares reductores y de cantidades significativas de minerales y otros constituyentes menores. La diferencia nutricional y funcional depende principalmente de estos componentes menores (Velásquez et al., 2019; Weerawatanakorn et al., 2021).

Producción de Panela en la región

En Colombia la producción de panela ha sido significativa en los últimos años con estabilidad en su producción (Tabla 2).

Tabla 2. Producción nacional de panela en Colombia (MinAgricultura, 2021).

Descripción	Años				
	2016	2017	2018	2019	2020
Área sembrada (ha⁻¹)	232,703	236,533	211,430	201,547	192,863
Área cosechada (ha⁻¹)	190,587	205,033	186,646	183,350	165,980
Producción (t)	1,150,465	1,254,799	1,183,373	1,162,396	1,085,567
Rendimiento (t.ha⁻¹)	6	6,1	6,6	6,5	6,5

La principal región panelera de Colombia está ubicada en la Hoya del Río Suarez; sin embargo, falta aún consolidar una producción suficientemente rentable, competitiva y amigable con el ambiente (González Chavarro et al., 2018). Uno de los aspectos más determinante en la producción de panela es la nutrición mineral, debido a que, actualmente, se hace de forma convencional (González Chavarro et al., 2018) presentándose restricciones nutricionales relacionadas especialmente con la baja eficiencia de absorción de nutrientes por parte de la planta y adicionalmente en el sistema productivo existe un desgaste en los suelos debido a las siembras constantes y las condiciones de ladera en muchas de las zonas de siembra del cultivo lo que conlleva a pérdidas por erosión y escorrentía. Adicionalmente existe una baja adopción de tecnologías biotecnológicas para la producción sostenible de caña de azúcar por parte de los agricultores. Por tanto, la incorporación de microorganismos en el cultivo de la caña de azúcar podría optimizar la fertilización y nutrición del cultivo permitiendo mayores rendimientos en cultivo y panela.

Normatividad Colombiana en la producción de panela.

El marco jurídico colombiano en la producción y comercialización de la panela se rige por las siguientes normas:

- Normatividad Sanitaria Vigente Resolución 779 de 2006 “Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para consumo humano y se dictan otras disposiciones” (MinSalud, 2006). Se establecen los principales parámetros de calidad en la tabla 3.

Tabla 3. Valoración de parámetros fisicoquímicos de calidad en panela sólida y jugos. Adaptado de Resolución 779 de 2006 (MinSalud, 2006) y laboratorio de panela AGROSAVIA-CIMPA.

Variable	Bajo	Adecuado	Alto
Grado de acidez (pH)	< 5,5	5,5 - 6,0	> 6,0
Sólidos solubles totales - SST (%)	< 89,0	89,0 - 95,0	> 95,0
Azúcares reductores (%)	< 5,5	5,5 - 10,0	> 10,0
Sacarosa (%)	< 80,0	80,0 - 85,0	> 85,0
Pureza (%)	< 84,0	84,0 - 95,0	> 95,0
Fosfatos (ppm)	< 800,0	800,0 - 1200	> 1200
Humedad (%)	< 5,0	5,0 - 10,0	> 10,0

- Resolución 3462 de 2008 Establece la inscripción de trapiches con los siguientes requisitos: Delimitación física de áreas, flujo secuencial de procesos y dotación de servicios sanitarios (MinSalud, 2008).
- Resolución 3544 de 2009 Ampliación de plazos hasta 2011 en empaque y rotulado de la panela (Minsalud, 2009).
- Resolución 4217 de 2013 Definición de empaque individual por “envase individual o por unidades de panela” (MinSalud, 2013).

Biología en el mejoramiento de la panela

Jaffé, (2015) destaca que los componentes nutricionales de la panela probablemente reflejan las diferencias entre las variedades de caña de azúcar y las condiciones agronómicas y de proceso. La relación entre el genotipo y el rendimiento y la calidad de panela ha sido reconocida hace muchos años, lo que llevó a la creación de colecciones de cultivares de caña de azúcar para su producción por parte de institutos de investigación agrícola en países como Colombia y Venezuela. Adicionalmente se han incorporado herramientas biotecnológicas mediante el uso de

microorganismos en el sistema productivo, como lo reporta Wilches Ortiz et al., (2019) con el uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares que promovieron un mejor desarrollo agronómico en variedades de caña de azúcar para panela, respuesta a la inoculación con un efecto benéfico de la asociación planta-microorganismo, reflejado en el crecimiento de las plántulas inoculadas, que para todas las variables analizadas presentaron resultados superiores al control sin inocular. Los autores destacaron el uso potencial de cepas de *Glomus* sp. y *Acaulospora mellea* que demostraron la mayor colonización micorrízica y la cuantificación de esporas de todos los microorganismos aislados.

Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA)

Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) datan desde hace 400 millones de años antes de que se originaran las primeras plantas (Barthole, 2018). Forman una simbiosis mutualista entre HFMA, pertenecientes al filo Glomeromycota, Glomeromycotina y el 80% de las especies de plantas terrestres (Harper et al., 2013). Los HFMA promueven un aumento significativo del área de absorción radicular de las plantas colonizadas, maximizando el uso de agua y nutrientes (Dos Santos et al., 2017). Los efectos benéficos de los HFMA sobre el rendimiento de las plantas y la salud del suelo son esenciales para la gestión sostenible de los ecosistemas agrícolas. Estos microorganismos contribuyen a la sostenibilidad al mejorar y reducir el desgaste y perturbación en suelos previamente cultivados con labranza y fertilización intensiva (Chavarria et al., 2018; Gianinazzi et al., 2010).

Metodología

Fase 1. Establecimiento y seguimientos agronómicos de caña de azúcar.

Localización del experimento

El ensayo se estableció en el municipio de Suaita Santander a 1.233 msnm en la vereda Benjamín en condiciones de agricultor en un área de 3.292 m².

Material vegetal

Se estableció un experimento con dos variedades de caña de azúcar, las cuales fueron previamente evaluadas y caracterizadas agroindustrialmente por el convenio AGROSAVIA-CENICAÑA, durante el 2007 al 2012, y posteriormente entregadas en el 2013 (CC 93-7711) y 2014 (CC 93-7510). Se realizó extracción manual de semillas de caña de las dos variedades, las cuales fueron dispuestas a germinación en canastillas con soporte inerte de Agrosavia ubicado en Barbosa, Santander (C.I. CIMPA).

Trasplante en vivero e inoculación de microorganismos

En estudios realizados por AGROSAVIA se aislaron HFMA originarios de cultivos de caña panelera establecidos en algunas de las regiones de mayor producción (Cundinamarca y Hoya del Río Suarez); estos aislamientos fueron caracterizados y escalonados para obtener una serie de inóculos de HFMA que fueron evaluados individualmente en plántulas de caña de tres variedades, identificándose dos cepas por cada grupo funcional que por su efecto benéfico en el desarrollo de las plántulas de caña se consideraron promisorios, los cuales fueron HFMA 1 (*Rhizophagus irregularis*) y HFMA 2 (*Acaulospora mellea*) (Figura 1).

Para la presente investigación se utilizaron las cepas mencionadas anteriormente, al momento del trasplante de vivero (semillero) a bolsas se realizó la inoculación de los HFMA con las dos variedades bajo estudio. Para la inoculación cada planta fue tratada con 70 esporas de HFMA, las cuales fueron cuantificadas por el método de Gerdemann & Nicolson (1963).

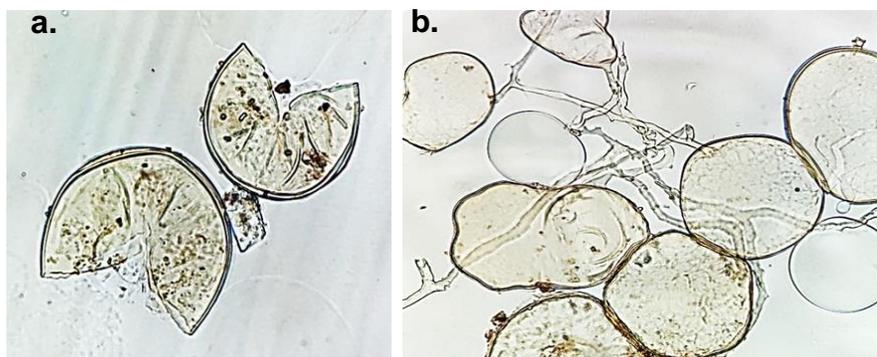


Figura 1. Imágenes microscópicas de las esporas de los HFMA con aumento de 40x en solución de alcohol polivinílico-ácido láctico glicerol (PVLG). **a)** *Acaulospora mellea*. **b)** *Rhizophagus irregularis*.

Diseño experimental

La investigación se estableció bajo condiciones experimentales independientes con algunas características similares en donde cada variedad de caña se maneja como un único ensayo tanto para el establecimiento de las parcelas experimentales como para el tratamiento de la información, ya que la respuesta a la fertilización y los requerimientos de cada una de las variedades es independiente.

El diseño corresponde a bloques completos al azar BCA con tres repeticiones, utilizando como material vegetal las dos variedades evaluadas en convenio AGROSAVIA-CENICAÑA (CC 93-7711 y CC 93-7510). Se evaluaron 4 tratamientos, 2 con y 2 sin microorganismos HFMA (Tabla 4). Como tratamientos control, se tienen dos controles con dos dosis de

fertilización química, uno con el 50% (igual que los tratamientos de inoculación) y un control con el 100% de la fertilización química, que se realiza teniendo en cuenta las características del suelo. La distribución de los tratamientos en las parcelas es completamente al azar y se bloqueó en contra de la pendiente del terreno en cada variedad vegetal debido a la topografía de este y a los requerimientos nutricionales de los materiales vegetales.

Tabla 4. Tratamientos en la localidad de Suaita.

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

Cada parcela experimental, estuvo conformada por 7 surcos de 6,6 metros lineales (51,48 m²), 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 m² con 175,67 m² de plantas para efecto borde y un área de tránsito 643,8 m², para un total de 2.055 m².

Manejo agronómico del cultivo

Las prácticas de mantenimiento incluyeron el control de malezas a los dos y cuatro meses de edad, rango de tiempo en el cual se realizó la aplicación de fertilización edáfica, de acuerdo con el análisis de suelo.

El ajuste integró los requerimientos reportados por estudios anteriores de fertilización en caña panelera (Manrique, 2000) y González Chavarro et al., (2018), estimando alcanzar una producción de 100 toneladas de caña por hectárea (TCH). Los planes de fertilización tuvieron como base los siguientes requerimientos nutricionales por hectárea donde se incluye la aplicación de enmiendas (cuando sea necesario), elementos mayores y menores: N (170 kg), P₂O₅ (50 kg), K₂O (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).

En la tabla 5 se presenta el esquema de fertilización empleado para los tratamientos de inoculación y los controles mediante fuentes simples y comerciales haciendo mezclas físicas para su aplicación en campo. La fertilización se hizo de forma fraccionada teniendo en cuenta las recomendaciones de acuerdo con los requerimientos nutricionales del cultivo de la caña y en concordancia con el ciclo fenológico del mismo.

Tabla 5. Esquema de fertilización empleado en los diferentes tratamientos.

Localidad	Suaita (T1 - T3)		
	Fertilización (Kg/ha) 50%*	2 mdt	4 mdt
Urea	75	75	
KCl	150	50	
DAP	37.5	-	
Kierserita	42.7	42.7	
Fertiminores	5.5	5.5	
Microman	13.5	13.5	
Borozinc	10	10	

Magnesil	12.5	12.5
Cal dolomita	350	-
Materia orgánica	-	-

*El tratamiento control con el 100% de la fertilización (T4) se fertilizó con el doble de las cantidades reportadas en la tabla 5.

Variables de seguimiento agronómico

Se evaluaron las variables de respuesta agronómica en diferentes etapas fenológicas del cultivo a los 4, 8 y 15 meses después del trasplante (mdt). Cada muestreo se realizó con un método destructivo de cosecha y se tomó información de altura de la planta (m) hasta la primera lígula visible, diámetro de tallos (cm) y cantidad de clorofila total (unidades SPAD, medidor de clorofila SPAD-502Plus®), en cinco (5) plantas al azar de los dos (2) metros lineales cosechados; en seis (6) metros lineales incluidos los cosechados, se cuantificó el número de hojas y tallos presentes; en los metros lineales cosechados los órganos presentes (hojas y yaguas) fueron debidamente separados y pesados (kg).

Dependiendo de la edad y desarrollo fisiológico de la caña a los 4, 8 y 15 mdt, se separaron los órganos funcionales de la planta (hojas, yaguas, cogollos y tallos), para determinar peso fresco del material. Del total de material se seleccionó una muestra representativa y homogénea para secado en condiciones de laboratorio, y de esta forma obtener peso de materia seca. Adicionalmente otra muestra (200-250 g), se envió al laboratorio de química del C.I Tibaitatá (Mosquera-Cundinamarca) 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.

Para la determinación de la materia seca (MS) se utilizaron las fórmulas descritas por González Chavarro et al., (2018), dividiendo el peso final (PF) del peso inicial (Pi) posterior al secado para la obtención del porcentaje de materia seca (Ecuación 1) y con respecto a la cantidad de materia seca por hectárea se multiplicó el porcentaje de MS por la materia fresca por hectárea (MFr) (Ecuación 2).

Para la obtención de la absorción de nutrientes se utilizó la fórmula descrita por González et al., (2018), usando los valores reportados de concentración de nutrientes por el laboratorio, en donde el valor de cada nutriente fue convertido a kg ha^{-1} de acuerdo con la ecuación 3.

$$MS (\%) = \left(\frac{PI}{PF} \right) \times 100 \quad [1]$$

$$MS (\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = (MS (\%) \cdot MFr) \quad [2]$$

$$\text{Nutriente} (\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = \left(\frac{CN (\%) \cdot MS}{100} \right) \quad [3]$$

Convenciones:

MS. Masa Seca.

PI: Peso inicial.

PF: Peso final.

MFr: Materia fresca ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

CN: Contenido de Nutrientes (%)

Para la determinación del índice de madurez en cañas se utilizó un refractómetro digital, relacionando los grados brix en el cuarto entrenudo hacia arriba desde la base del tallo y en el

cuarto entrenado hacia abajo desde la parte apical del tallo (Ramírez Durán et al., 2014). Cuando los materiales alcanzaron su índice de madurez adecuado (0,95 a 1,00) para cosecha, se realizó conteo y pesaje de los tallos presentes en 2 metros lineales, en tres puntos de unidad de muestreo para determinar la masa fresca. Con la información obtenida de la cosecha se determinó el rendimiento de toneladas de caña por hectárea (TCH) de acuerdo a la fórmula de Volverás-Mambuscay et al., (2020) descrita en la ecuación 4. Se destaca que la distancia de siembra entre surcos fue de 1.3 metros.

$$TCH = \left(\frac{MFr \cdot Um \cdot Mlh}{Um} \right) / 1000000 \quad [4]$$

Convenciones:

TCH. Toneladas de caña por hectárea

MFr: Masa Fresca de tallos

Um: Unidad de muestreo (2 m lineales).

Mlh: Metros lineales de tallos de caña en una hectárea (7692,3).

Fase 2. Producción de panela y jugos.

Obtención de panela y sus rendimientos

Con la información obtenida de las cosechas en campo se determinó el rendimiento de toneladas de caña por hectárea (t/ha), rendimiento de panela (%) y toneladas de panela por hectárea. Cuando los materiales alcanzaron el índice de madurez adecuado (0,95 a 1,00) para cosecha, se colectaron 15 kg de caña por cada unidad experimental (UE) y se realizó la prueba de

molienda experimental en el trapiche de CIMPA-Agrosavia. Para la obtención de panela se siguieron los procedimientos descritos por Guamán et al., (2007) y Nuñez (2020):

- Apronte: Se selecciona y ubica la caña panelera en una zona seca bajo techo, dicha caña debe pasar a la molienda en el menor tiempo posible después de ser cortada, para mejor rendimiento.
- Molienda: Se introduce la caña panelera cortada en el molino, con el fin de obtener el jugo de esta (por cada UE se obtendrá 4 Kg de jugo para procesar), y como residuo resulta el bagazo el cual se usa como combustible en el proceso de evaporación y concentración.
- Clarificación: Eliminación de los sólidos en suspensión, las sustancias coloidales y algunos compuestos colorantes presentes en los jugos durante la producción de panela mediante la aglomeración de dichas partículas a través de la adición de clarificantes y óxido cálcico, así a los 40°C adición de solución de óxido de calcio a pH=5,5, al alcanzar 50°C de sustancia clarificante (1ra dosis), luego a los 80°C adición de solución de óxido de calcio a pH=6,4, y finalmente a los 85°C Sustancia clarificante (2da dosis).
- Evaporación y Concentración Punteo: La evaporación se lleva a cabo en la hornilla, para eliminar el 90% del agua presente en el jugo, en esta fase las mieles de panela alcanzan temperaturas superiores a 100°C, se realiza en pailas concentradoras o punteadoras. Para obtener el punto de panela en bloque estas mieles deben estar entre 118°C y 122 °C, la cual corresponde a un porcentaje de sólidos solubles entre 88-94 °Brix.
- Batido y enfriamiento: El batido se realiza en bateas amplias poco hondas, donde se vierte la miel obtenida, se espera que se enfríe y se mezcla de manera constante no muy

lento, para obtener una miel homogénea y reducir su capacidad de adherencia. En esta etapa, la mezcla obtiene un color más claro que al inicio.

- Moldeo: Se vierte la miel en moldes de madera, con capacidad de 1 lb para así obtener la panela en bloque.

Se utilizaron las ecuaciones de conversión a panela y de producción de panela por hectárea reportadas por Volverás-Mambuscay et al., (2020). La caña colectada en campo, el jugo obtenido por la caña y la panela en bloque se pesaron de manera individual por cada UE para el posterior procesamiento de datos de caña requerida para la obtención de los 4 kg de jugo a procesar (Ecuación 5), cálculo del porcentaje de conversión de caña a panela (Ecuación 6) y toneladas de panela por hectárea (TPH) (Ecuación 7).

$$CR = \left(\frac{4 \text{ kg de jugo} \cdot PDC \cdot UE(kg)}{JO \times UE(kg)} \right) \quad [5]$$

$$CCP (\%) = \left(\frac{PO \cdot UE(kg)}{CR} \right) \times 100 \quad [6]$$

$$TPH = \left(\frac{TCH \cdot CCP (\%)}{100} \right) \quad [7]$$

Convenciones:

UE. Unidad experimental

CR: Caña requerida para 4 kg de jugo.

PDC: Peso de la caña

JO: Jugo Obtenido

CCP: Conversión de caña a panela.

PO: Panela obtenida

TPH: Toneladas de panela por hectárea.

TCH: Toneladas de caña por hectárea.

Caracterización fisicoquímica de jugos y panela

Para determinar los parámetros fisicoquímicos de la normatividad vigente en panela (MinSalud, 2006) se desarrollaron en el laboratorio del Cimpa-Agrosavia las determinaciones de: sólidos solubles totales (refractómetro), potencial de hidrógeno (pH-metro), sacarosa (polarímetro), azúcares reductores (método volumétrico de Lane y Eynon, 1923), fósforo soluble “ppm de P_2O_5 ” (Método ácido ascórbico-espectrofotometría), pureza y porcentaje de humedad. La determinación de estas variables se realizó de acuerdo con el protocolo de laboratorio de CIMPA (AGROSAVIA) reportado por Ramírez Durán et al., (2014), que se detalla a continuación:

Determinación de pH en Jugo y panela.

Jugo: Se toman 50 mL de la muestra y se filtra con una malla de 100 mesh, luego se agita hasta obtener una muestra homogénea.

Panela: Se pesan 5 g de panela, y se disuelven en agua destilada hasta obtener un volumen de 50 mL (Dilución 1:10).

Determinación de la concentración de azúcares totales en Jugo y Panela (°Brix)

La preparación de la muestra de jugo se realizó como fue descrito en la determinación de pH.

Panela: Se toma una muestra de panela (previamente rayada y homogenizada). Posteriormente, se pesan 10 g en la balanza analítica, agregando aproximadamente 30 g de agua hasta obtener una dilución $\frac{1}{4}$ en % p/p, luego se coloca la mezcla en agitación hasta que se diluya completamente.

Determinación de porcentaje Sacarosa en Jugo y panela.

La preparación de la muestra de jugo se realizó como fue descrito en la determinación de pH.

Panela: Se toma una muestra de panela previamente rayada y homogenizada, pesando 10 g en la balanza analítica (precisión de 0.01 g). Se agrega 50 mL de agua destilada hasta que la mezcla quede bien diluida. Luego, esta dilución se lleva a un balón aforado de 100 mL y se completa el volumen con agua destilada para obtener una dilución 1:10 p/v.

Procedimiento para panela: Se toman 50 ml de jugo previamente filtrado a través de una malla de 100 mesh, agregando 1 ml de solución de subacetato de plomo o lo necesario para una clarificación sin excederse los 2 mL. Luego, se agrega 1 g de celite al papel filtro, y se filtra la solución por gravedad, desechando los primeros 10 mL del filtrado, y se procede a tomar la lectura en °Brix a la solución filtrada. Luego, el equipo utilizado se ajusta al punto cero con agua destilada, purgando previamente el tubo de polarizar. Finalmente, el tubo de polarizar se llena con la muestra, verificando que en su interior no queden burbujas, y se toma la lectura respectiva. El procedimiento se realiza por triplicado.

Los cálculos para determinar el % de Sacarosa fueron los siguientes:

Para Jugo se emplea la fórmula de Echmitz's (Ecuación 8).

$$\text{Ecuación de Echmitz} = \frac{Lp \cdot 0,9293 + 0,0732}{Bx \text{ ext} \cdot 0,017 + 3,814} \quad [8]$$

Donde,

Lp = Lectura polarimétrica

$Bx \text{ ext}$ = Brix extracto

Para Panela se emplea la misma fórmula, pero se tiene en cuenta el factor de dilución para determinar el % de Sacarosa (Ecuación 9).

$$\text{Ecuación de Echmitz} = \frac{Lp \cdot 0,9293 + 0,0732}{Bx \text{ ext} \cdot 0,017 + 3,814} \cdot FD \quad [9]$$

Donde,

FD = Factor de Dilución

Determinación de porcentaje de Azúcares Reductores en jugo y panela.

Los azúcares reductores (AR) se obtienen por la técnica de Lane & Eynon (1923). La fórmula para su determinación corresponde a la ecuación 10:

$$AR (\%) = \left(\frac{FF}{mL \text{ consumidos de muestra}} \right) \cdot FD (1:10) \quad [10]$$

Donde:

AR: Azúcares reductores

FF: Factor Fehling

FD: Factor de dilución

El factor de dilución es igual a 1 para el caso de jugo de caña. Obtención del factor de Fehling: se pesan 0,5 g de glucosa o fructosa y se diluyen a un volumen de 100 mL, y se titula

como si fuese una muestra. Los mL consumidos en esta titulación se multiplican por el peso de la glucosa o fructosa. El análisis se realiza por triplicado.

La preparación de la muestra de jugo se realizó como fue descrito en la determinación de pH.

Panela: Se pesan 10 g de panela previamente rallada y se le agregara 50 mL de agua hasta que la mezcla este bien diluida.

Procedimiento: En una bureta de 25 mL se introduce la muestra de jugo o panela. En un Erlenmeyer de 150 ml, a 5 mL de Fehling A y Fehling B se les agregaron 3 gotas de aceite mineral y un agitador magnético; se coloca en la plancha de calentamiento hasta el punto de ebullición, y a partir de este momento se contabilizan 2 minutos, y se agregan 3 gotas de azul de metileno; durante un minuto se titula la solución de Fehling con la muestra de jugo o panela. El volumen de la muestra consumido se utiliza para la determinación del % de azúcares reductores.

Determinación de porcentaje de humedad en panela.

La obtención de materia seca en el horno se realizó por triplicado. Se aplicó la fórmula para la determinación del porcentaje de humedad en panela (Ecuación 11).

$$\% \text{ de humedad} = \frac{PI - PFr}{PI - PC} \cdot 100 \quad [11]$$

Donde:

PI: Peso inicial

PFr: Peso fresco

PC: Peso caja

Determinación de porcentaje de pureza en jugos y panela.

La pureza es la relación porcentual (%) entre el contenido de sacarosa y el contenido total de azúcares (°Brix), que indica el grado de pureza de la muestra en función del contenido de sacarosa y se calcula mediante la ecuación 12:

$$\% \text{ de Pureza} = \frac{\% \text{ sacarosa}}{\% \text{ de SST (°Brix)}} \cdot 100 \quad [12]$$

Análisis estadísticos

Todos los experimentos se realizaron por triplicado y los datos se expresaron como media \pm desviación estándar. La información se analizó mediante análisis de varianza (ANOVA), para establecer si hay diferencias en los tratamientos evaluados. Se verificaron los supuestos de normalidad e igualdad de varianza en los residuos del modelo de ANOVA. Para la comparación entre tratamientos se utilizó la prueba de Tukey ($P \geq 0,05$). Adicionalmente se realizaron correlaciones de Pearson y análisis multivariados de correspondencia canónica. En los análisis se utilizó el software estadístico R® (R Core Team, 2020) con las librerías, corrplot, CCA (Gonzalez & Déjean, 2021) y ggplot2 (Wickham, 2016), en todos los casos se usó una $p < 0,05$.

Resultados y discusión

Fase 1. Establecimiento y seguimientos agronómicos de caña de azúcar.

Los resultados con sus respectivas pruebas de comparación (Tukey) se registran a continuación:

En la figura 2 se observan los resultados relacionados con la variable altura. De acuerdo al ANOVA, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la variedad CC 93-771 en los tres momentos de muestreo; para la variedad CC 93-7510 no se evidencian diferencias significativas a los 4 meses después de trasplante (mdt), pero a los 8 mdt si se presentaron diferencias significativas, siendo el tratamiento de inoculación T1 el que registro 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. Algunos autores resaltan un incremento en la altura de plantas de caña de azúcar inoculadas con consorcios de HFMA (Sulistiono et al., 2017; Wilches Ortiz et al., 2019), se podría atribuir que en este estudio la inoculación de una sólo cepa no potencializa al máximo su beneficio en el crecimiento de la planta.

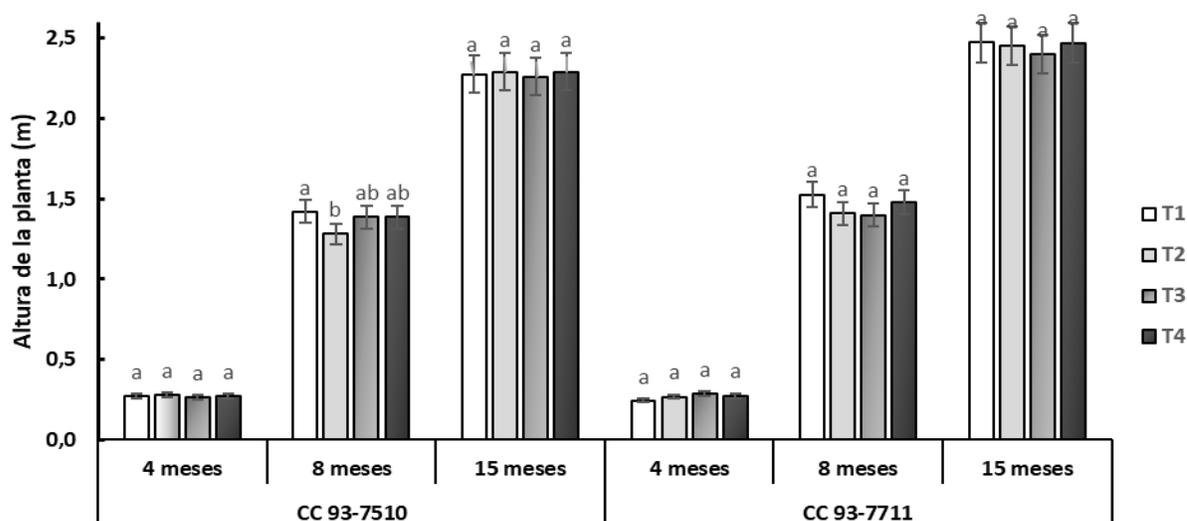


Figura 2. Altura de plantas de caña a los 4, 8 y 15 mdt.

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 ($n = 5$).

La variable diámetro de tallo se evaluó a los 8 y 15 mdt (Figura 3). De acuerdo con el análisis de varianza no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, pero se encontraron valores más altos al control. En el caso de la variedad CC 93-7510 en promedio se lograron diámetros superiores a 2,5 cm y para la variedad CC 93-771 > 3cm. 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 hongos formadores de micorrizas arbusculares por presentar un mayor diámetro de caña (>3.3 cm) respecto al control.

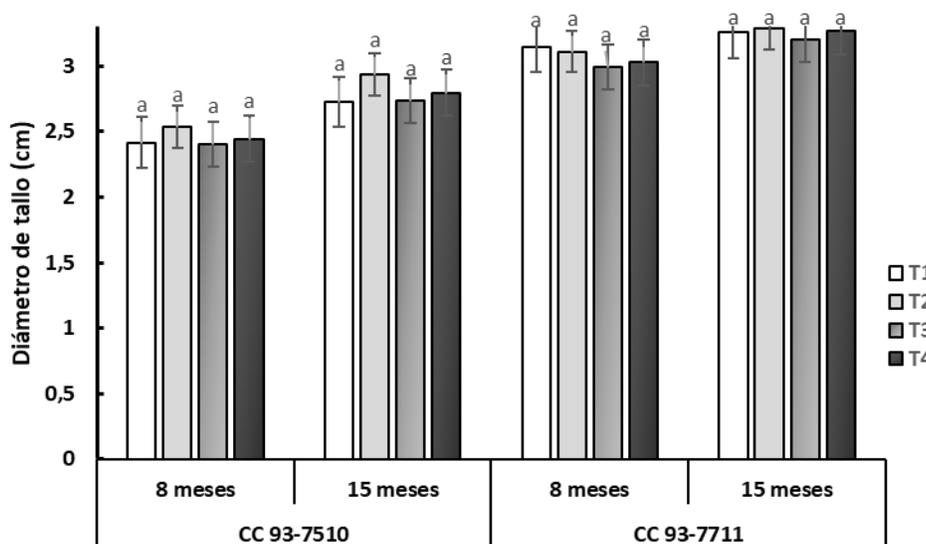


Figura 3. Diámetro de tallo de plantas de caña a los 8 mdt y 15 mdt.

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 ($n = 5$).

Con respecto a la variable, clorofila total se realizó la evaluación a los 4, 8 y a los 15 mdt (Figura 4). Al realizar el análisis de varianza se presentaron diferencias significativas en la variedad CC 93-7711 a los 4 y 15 mdt, donde el tratamiento control 100% (40,50 Spad) fue superior al tratamiento de inoculación T1 (35,17 Spad) a los 4 mdt, pasando a ser menor a los 15 mdt. Los demás tratamientos a los 4 mdt (T2 y el T3) presentaron un comportamiento intermedio (<36,44 Spad), destacándose a los 15 mdt un comportamiento superior de los tratamientos inoculados (T1 y T2). Para la variedad CC 93-7510 a los 8 mdt se evidencian diferencias significativas entre tratamientos, donde el tratamiento 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 micorrizas fue más alta que en el control, aunque en este estudio no se presentaron diferencias significativas.

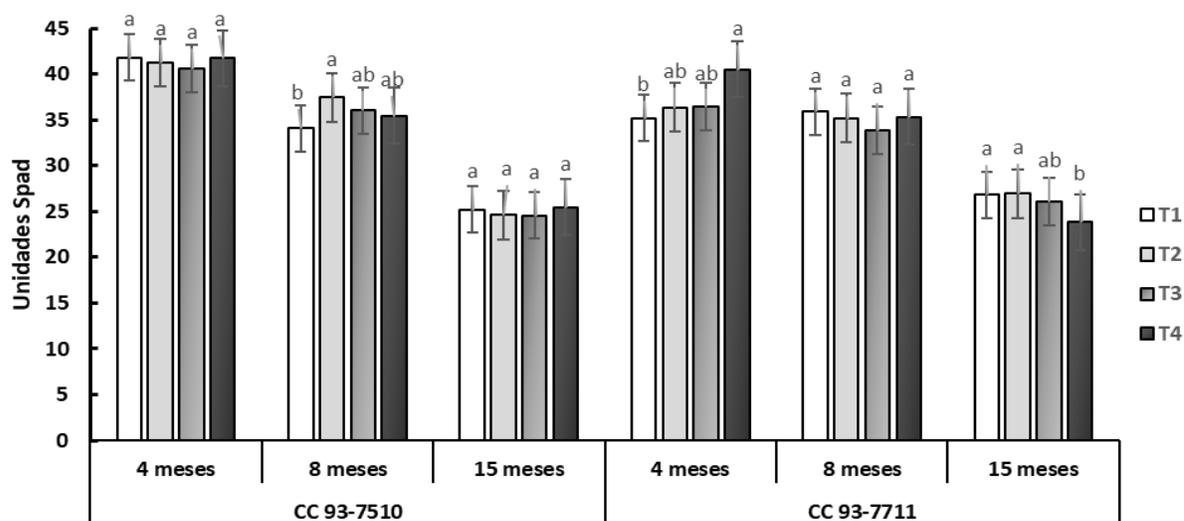


Figura 4. Clorofila total en plantas de caña a los 4, 8 y 15 mdt.

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 ($n = 5$).

Con respecto al índice de madurez de la caña a los 15 mdt se destaca que, aunque no existieron diferencias estadísticas en la variedad CC 93-7510, si se evidencia que en la inoculación T1 se obtuvo un valor más alto a los demás tratamientos. Con respecto a la variedad CC 93-7711 se presentaron diferencias estadísticas en donde el tratamiento de la inoculación T2 (*R. irregularis*) presentó el mayor índice de madurez (Figura 5), coincidiendo con Ehsanipour et al., (2019) que consideraron que la inoculación con HFMA favorece de forma positiva la obtención del índice de madurez adecuado para la cosecha de la caña de azúcar.

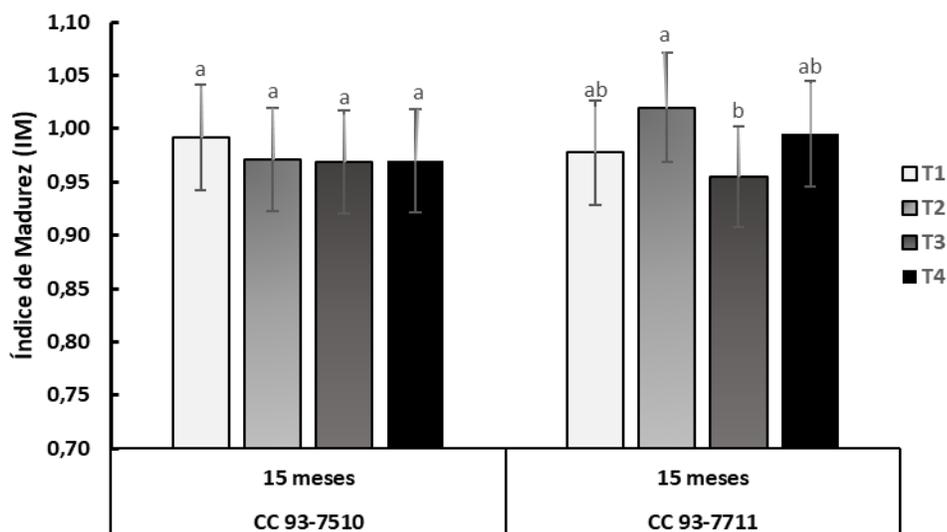


Figura 5. Índice de madurez de caña de azúcar a los 15 mdt.

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 ($n = 5$).

En la variable de materia seca total realizada a los 4, 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 6). 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. irregularis* un aumento del 5 % en la materia seca de la caña de azúcar a los 15 mdt.

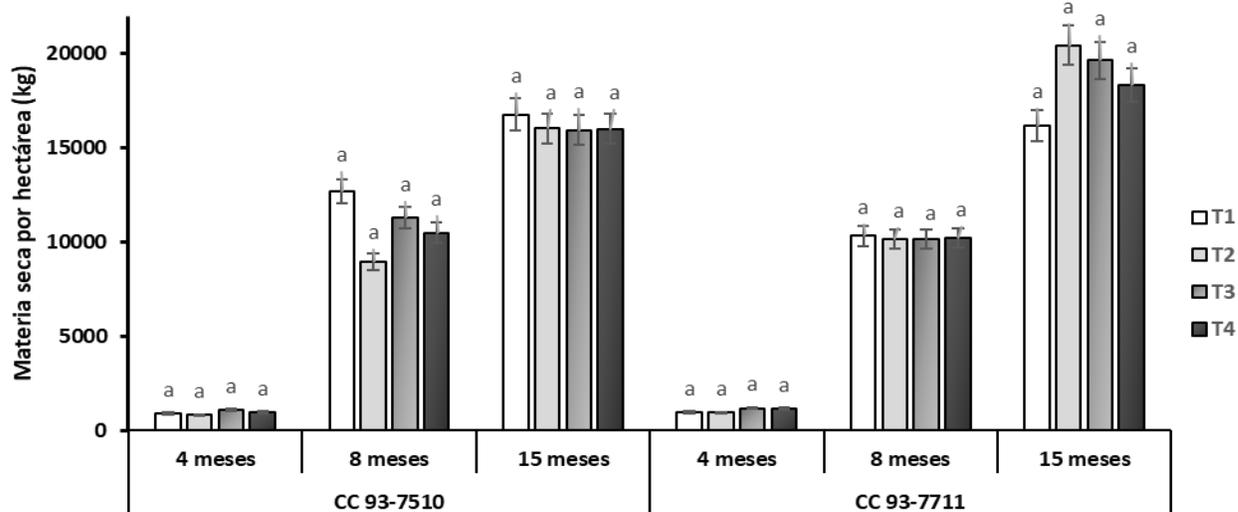


Figura 6. Materia seca total por hectárea a los 4, 8 y 15 mdt.

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 ($n = 5$).

Finalmente, para la variable toneladas de caña por hectárea (TCH), en ninguna de las dos variedades CC 93-7510 y CC 93-7711 se presentaron diferencias significativas. Sin

embargo, en la figura 7 se puede apreciar que para el caso de la variedad CC 93-7711 el tratamiento T2 registro los valores más altos (157,5 TCH) respecto a los demás tratamientos y al promedio nacional de 139 TCH (Ramírez Durán et al., 2014), los cuales registraron valores inferiores, mostrando el beneficio de la inoculación de *R. irregularis*, lo cual permite la sustitución del 50% del fertilizante químico de síntesis, coincidiendo con diferentes autores que reportan un beneficio del uso de los HFMA, los cuales permiten obtener una mayor cantidad de tallos por unidad de área (Datta & Kulkarni, 2012; Ehsanipour et al., 2019; Sulistiono et al., 2017; Wilches Ortiz et al., 2019).

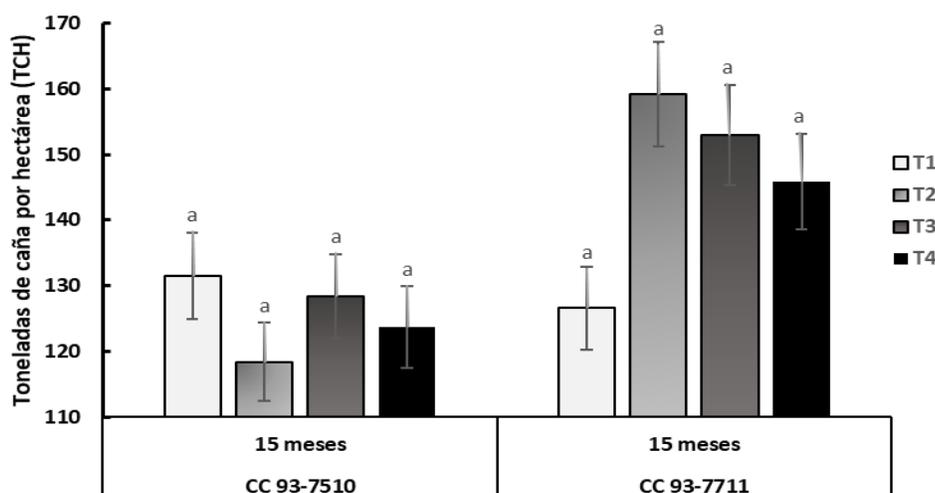


Figura 7. Toneladas de caña por hectárea a los 15 mdt.

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 ($n=5$).

Resultados de Nutrientes en caña de azúcar

A continuación, se presentan los resultados relacionados con la concentración de nutrientes en tejido de la planta a los 15 mdt. Según el ANOVA, no se presentaron

diferencias estadísticas en la absorción de P (Figura 8b), K, Mg (Figura 9), Ca, Na (Figura 10) B y Zn (Figura 13) entre tratamiento en las dos variedades. Se presentaron diferencias estadísticas en la variedad CC 93-7711 con *R irregularis* en los nutrientes N (Figura 8a), S, Fe (Figura 11) y Mn (Figura 12b) y en la variedad CC 93-7510 entre tratamientos en los valores de Mn con la inoculación de *A. mellea* (Figura 12b). Demostrando los beneficios de la inoculación de estos HFMA en la concentración de nutrientes en las plantas de caña.

Juntahum et al., (2020) atribuyeron a *Funneliformis mosseae* mejoras en la altura y el peso seco de la planta en más del 67 %, así como el contenido de N en plantas de caña de azúcar en un 42 % en comparación con la no inoculación, en el presente estudio se encontró un 29% de aumento en el contenido de Nitrógeno con *R. irregularis* respecto al control T4 en la variedad CC 93-7711 (Figura 8a). Juntahum et al., (2020) también 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. irregularis* en un 36 % respecto al control (T4). Se coincide con Fors et al., (2020) en donde demostraron que la inoculación de HFMA (*Rhizophagus clarus*) aumentó la absorción de P en la caña de azúcar (variedad SP81-3250).

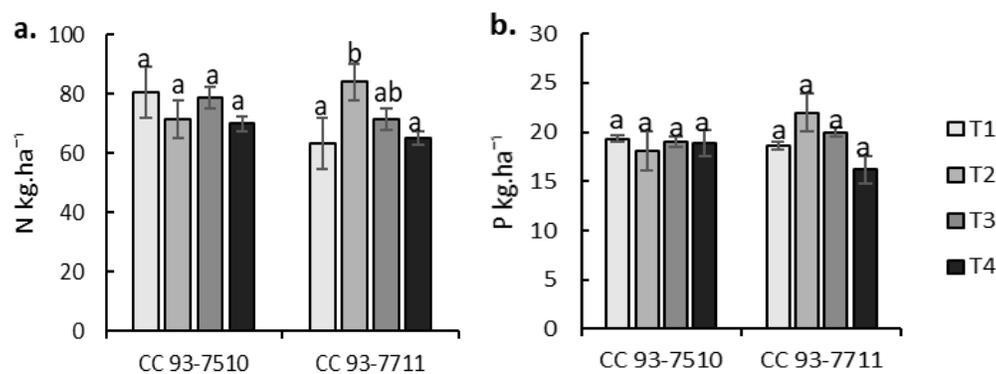


Figura 8. Absorción de macronutrientes de a) Nitrógeno y b) Fósforo a los 15 mdt.

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 ($n=5$).

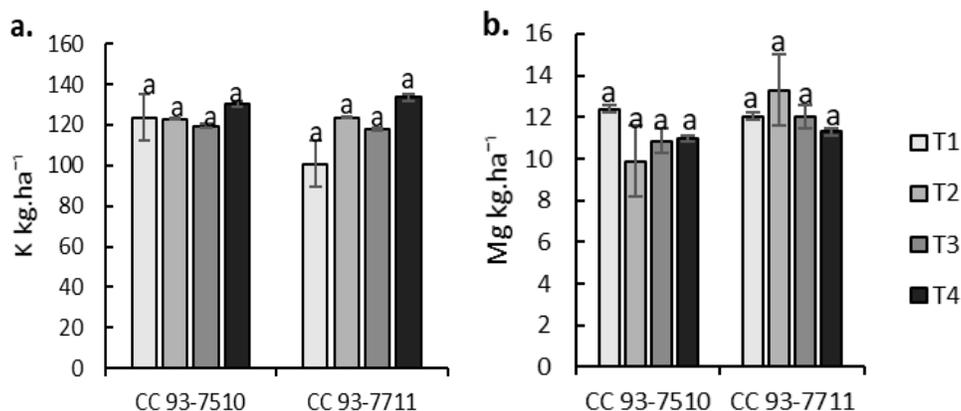


Figura 9. Absorción de **a)** Potasio y **b)** Magnesio a los a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

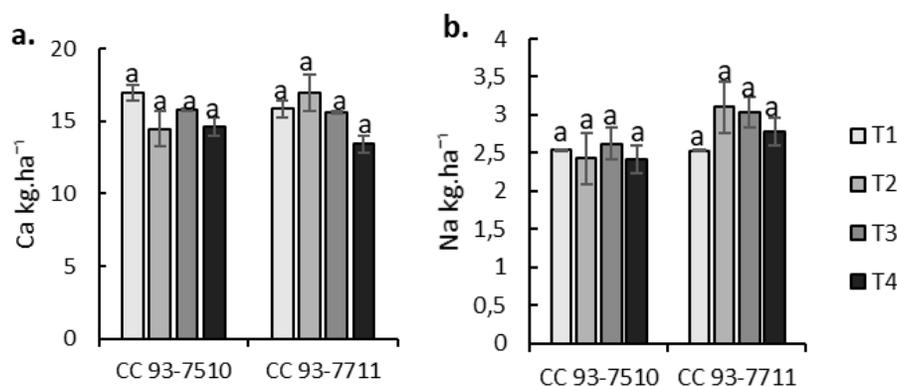


Figura 10. Absorción de **a)** Calcio y **b)** Sodio a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

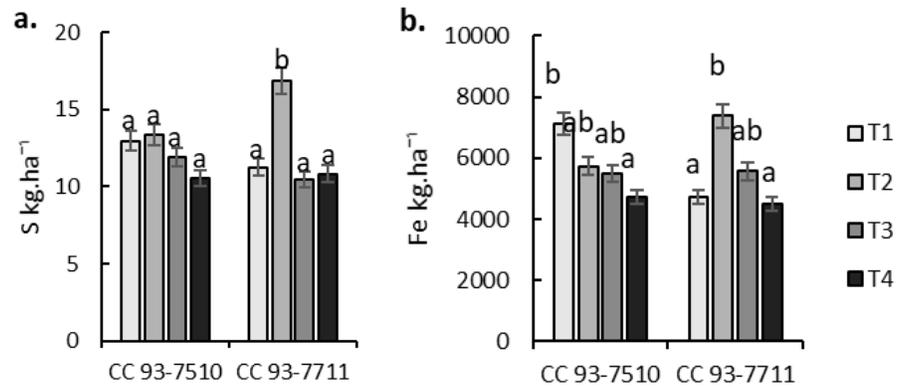


Figura 11. Absorción de **a)** Azufre y **b)** Hierro a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos (n=5).

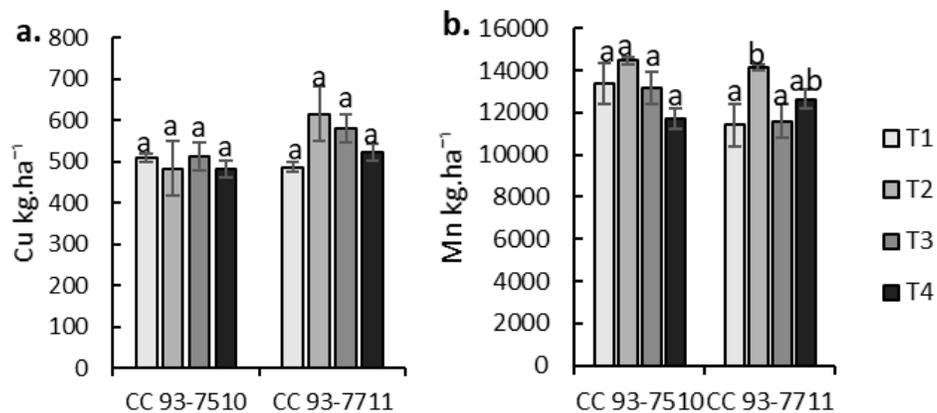


Figura 12. Absorción de **a)** Cobre y **b)** Manganeso a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos (n=5).

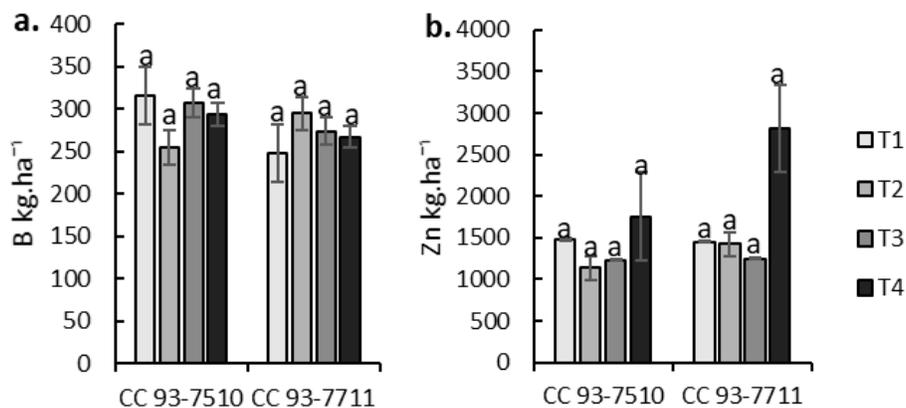


Figura 13. Absorción de Micronutrientes **a)** Boro y **b)** Zinc a los 15 mdt. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

Finalmente en la figura 14 se ilustra el Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) con un 78 % de la varianza total, destacándose la relación presentada entre *A. mellea* con la absorción de Na, Cu, Mn, S, N y P en caña de azúcar, coincidiendo con reportes de HFMA en otras gramíneas en donde encontraron que la inoculación de *Rhizophagus irregularis*, *Rhizoglyphus fasciculatum* y *Funneliformis mosseae* mejoraron ligeramente los contenidos de N, P, Cu, Mn en plantas de trigo respecto a los controles (Jan et al., 2014). En estudios de Ramírez et al., (2016) encontraron un aumento significativo del contenido de P en las plantas respecto a las no inoculadas, en el presente estudio *Acaulospora mellea* presentó una estrecha relación con el contenido de P en plantas de caña.

En el ACC (Figura 14), la inoculación de *Rhizophagus irregularis* 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. irregularis* respecto a otros consorcios de HFMA y los controles, lo cual coincide en este estudio en donde el contenido de Fe en

plantas de caña tuvo mayor afinidad con *R. irregularis*. El ACC permitió observar la correlación 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 inoculados para adquirir eficientemente nutrientes favoreciendo la acumulación de biomasa en la caña de azúcar.

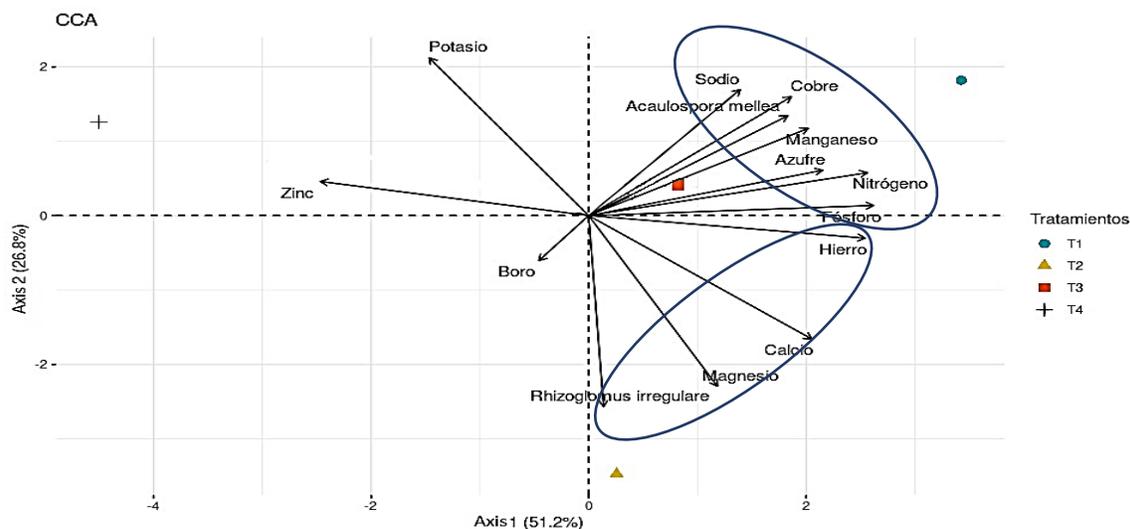


Figura 14. Análisis de correspondencia canónica general de la absorción de nutrientes en caña de azúcar en relación con la inoculación de HFMA. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química.

Fase 2. Producción de panela y jugos.

Los resultados con sus respectivas pruebas de comparación (Tukey) se registran a continuación:

Resultados producción de panela

En la variable de toneladas de panela por hectárea (TPH) no se encontraron diferencias estadísticas (Figura 15). Sin embargo, se observó en la variedad CC 93-7711 que T2 (*R. irregularis* con el 50 % de fertilización) presentó un rendimiento mayor a T4,

demostrando los beneficios de la inoculación con este microorganismo, reflejada en un incremento de 3,33 TPH respecto al control (T4) (Figura 15).

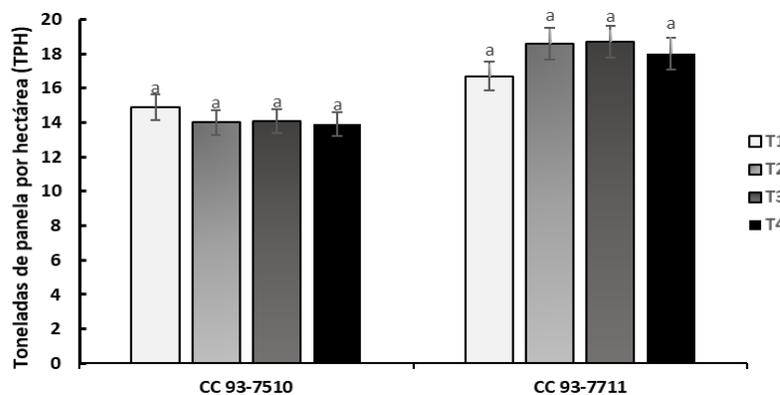


Figura 15. Producción de toneladas de panela por hectárea en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos (n=5).

La variable de conversión de panela no presentó diferencias estadísticas, se destaca que en la variedad CC 93-7510 el valor más alto es del tratamiento de inoculación T2 y en la variedad CC 93-7711 es el tratamiento de inoculación T1 (Figura 16). Volverás-Mambuscay et al., (2020) reportan que el porcentaje de conversión de caña a panela (rendimiento a panela) tiene una alta importancia económica y técnica. Aunque no se presentaron diferencias significativas, se observó que en la variedad CC 93-7711 con el tratamiento de inoculación de *A. mellea* (T1) se logró un 0,05 % y en la variedad CC 93-7510 con *R. irregularis* (T2) un 3,35 % de incrementos con respecto al tratamiento control del 100% de fertilización sin inoculación (T4), demostrando que la inoculación de este microorganismo puede reducir la fertilización en un 50%. El porcentaje de conversión a panela disminuyó en tratamientos con menores aportes de fertilizantes N-P-K (Volverás-Mambuscay et al., 2020), por tanto, la

inoculación de *A. mellea* contribuye en la fertilización con un porcentaje igual o mayor de conversión de caña a panela.

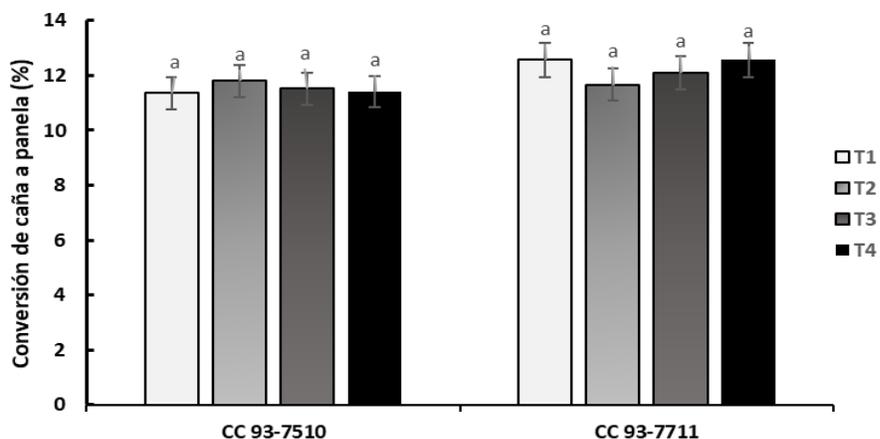


Figura 16. Conversión de panela en las variedades CC 93-7711 y CC 93-7510. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

Parámetros Físicoquímicos en Jugos

Los parámetros físicoquímicos en jugos no presentaron diferencias estadísticas en las dos variedades (Tabla 6). De acuerdo a la Resolución 779-2006 del MINSALUD, (2006) se destaca que los resultados obtenidos en jugos en las dos variedades de caña se encuentran acordes a los parámetros establecidos, con excepción de los azúcares reductores que presentaron valores por debajo del rango establecido en la norma (5,5 a 12 %). Adicionalmente se presentaron diferencias estadísticas significativas del fósforo soluble en jugos con la inoculación de *A. mellea* en la variedad CC 93-77510, un factor importante debido a que el fósforo soluble se ha considerado de alta importancia en la clarificación de los jugos de caña de azúcar (Sorol et al., 2019).

Tabla 6. Características fisicoquímicas en jugos en las variedades CC93-7510 y CC 93-7711. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química.

Jugos Caña	Azúcares no reductores	Azúcares reductores	Fósforo soluble	Potencial de Hidrógeno	Temperatura	Pureza	Sólidos totales solubles
CC93-7510	Sacarosa (%)	Glucosa (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	pH	°C	%	°Brix (%)
T1	Ad. 20,28 a	Ba. 0,69 a	Al. 729,75 b	Ad. 5,34 a	21,10 a	Ad. 94,46 a	Ad. 21,47 a
T2	Al. 21,02 a	Ba. 0,66 a	Ad. 592,10 a	Ad. 5,35 a	21,00 a	Al. 97,82 a	Ad. 21,49 a
T3	Ad. 20,30 a	Ba. 0,63 a	Ad. 527,11 a	Ad. 5,37 a	21,70 a	Ad. 95,18 a	Ad. 21,33 a
T4	Ad. 20,80 a	Ba. 0,70 a	Ad. 540,04 a	Ad. 5,33 a	21,70 a	Ad. 95,81 a	Ad. 21,71 a
CC93-7711	Sacarosa (%)	Glucosa (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	pH	°C	%	°Brix (%)
T1	Ad. 19,75 a	Ba. 0,58 a	Ad. 562,67 a	Ad. 5,35 a	21,00 a	Ad. 96,69 a	Ad. 20,43 a
T2	Ad. 20,52 a	Ba. 0,58 a	Ad. 553,14 a	Ad. 5,41 a	20,95 a	Al. 99,40 a	Ad. 21,00 a
T3	Ad. 20,00 a	Ba. 0,46 a	Ad. 545,48 a	Ad. 5,23 a	21,00 a	Ad. 95,46 a	Ad. 20,95 a
T4	Ad. 20,66 a	Ba. 0,56 a	Ad. 528,81 a	Ad. 5,18 a	20,95 a	Al. 98,76 a	Ad. 20,92 a

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 (n=5). Las siglas Ba (Bajo), Ad (Adecuado) y Al (Alto) corresponden a la valoración de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos en jugos de la Resolución 779-2006 del MINSALUD, (2006).

Parámetros Fisicoquímicos en Panela

Los parámetros fisicoquímicos en panela solo presentaron diferencias estadísticas en la variedad CC 93-7711 en los azúcares reductores los cuales fueron adecuados y con un mayor valor (9,3 %), en concordancia con Durán Castro (2010), quien menciona que un contenido aceptable en panela no debe superar el 10 %, para evitar problemas de calidad

(consistencia y vida útil). Según la norma colombiana (Res 779-2006), los contenidos totales de azúcares reductores y sacarosa deben estar en rangos de 5,5 a 12 % y de 75 a 83 %, respectivamente (Minsalud, 2006), lo que concuerda con los resultados obtenidos (Figura 17 y 18). Los HFMA generan un mayor incremento en la concentración de azúcares, como lo reportan para *Glomus clarum* en fresa (Soria Martínez, 2012), consorcios HFMA en maíz (Samano, 2014). Gupta et al., (2021) informaron el incremento en el contenido de azúcares en trigo (*Triticum aestivum* L.) como respuesta a la inoculación con *Rhizophagus irregularis* antes *R. intraradices*. Adicionalmente, Qiang-Sheng et al., (2016) informan de la respuesta positiva a la inoculación con *Acaulospora scrobiculata* y *Funneliformis mosseae* en naranja trifoliada (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) con incrementos en glucosa y sacarosa frente a tratamientos sin inoculación de HFMA, coincidiendo con este estudio en el cual *Acaulospora mellea* presentó diferencias estadísticas significativas en el contenidos de glucosa en panela en la variedad CC 93-7711 y un mayor contenido de Glucosa con *R. irregularis* en la variedad CC 93-7510 respecto a los demás tratamientos (Figura 17 y 18). Se obtuvo un mayor porcentaje de humedad con el T2 respecto a los demás tratamientos (Figura 17 y 18), presentándose valores que se encuentran en el rango (1,5 a 15,8%) reportado en panela (Jaffé, 2015; Lee et al., 2018).

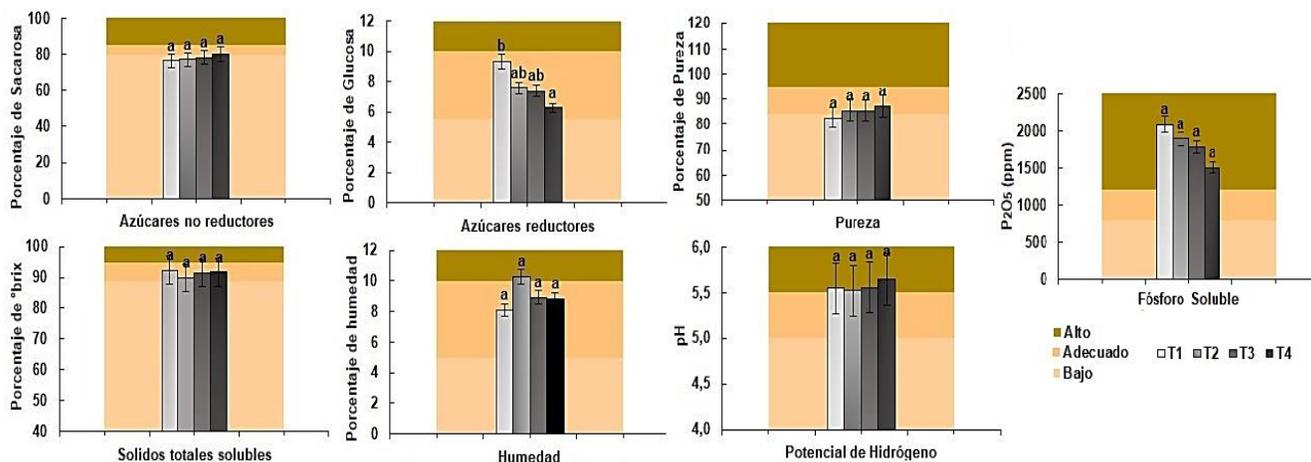


Figura 17. Características fisicoquímicas de pana de variedad CC 93-7711. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

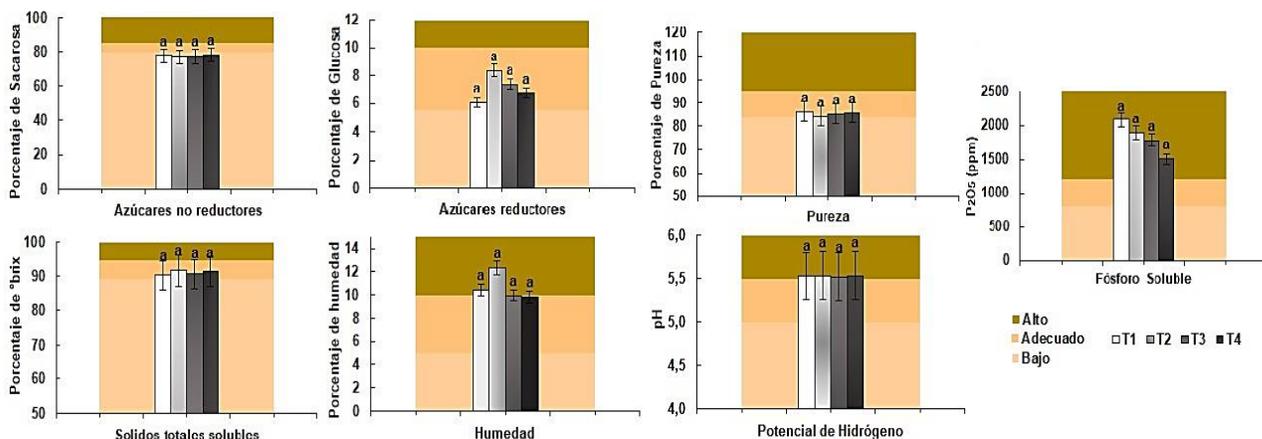


Figura 18. Características fisicoquímicas de pana de variedad CC 93-7510. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química. Medias con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) entre tratamientos ($n=5$).

Se destaca un alto valor de fósforo soluble con la inoculación de HFMA respecto a los demás tratamientos. Se presentó un mayor contenido con el inóculo de *R. irregularis* en

las dos variedades (Figura 17 y 18), esta relación se ha descrito en otros estudios, como el reportado por Baslam et al., (2011) en lechuga (*Lactuca sativa* L.) con un aumento nutricional de fosfatos, debido a los HFMA inoculados y el de Sawers et al., (2017) en 30 variedades de maíz (*Zea mays* L.) inoculadas con *Rhizophagus irregularis* en donde encontraron una alta absorción de fosfato que se correlacionó positivamente con la inoculación de este HFMA, coincidiendo con las pruebas de Pearson de este estudio que demostraron correlación directa de *R. irregularis* y el fosforo soluble (figura 19, 20 y 21), también representado en los análisis de correspondencia canónica (Figura 22 y 24).

Diferentes estudios informan que las cepas de *Rhizophagus irregularis* mejoran la calidad y los sólidos totales solubles (grados brix) en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Schubert et al., 2020), frutos de cereza dulce (*Prunus avium*) (Barry et al., 2017) y en tubérculos de ñame mayor (*Dioscorea alata*) (Kumar et al., 2022), lo cual coincide con los resultados del análisis de correspondencia canónica (ACC) (Figura 22) que demuestra el beneficio y la estrecha relación de *R. irregularis* con los grados brix obtenidos en panela. Adicionalmente el ACC arrojó una relación positiva de *R. irregularis* con la sacarosa en panela, coincidiendo con otros estudios, como el de Shao et al., (2019), en donde la inoculación de los HFMA representó un mejoramiento en la calidad en hojas de Té (*Camellia sinensis* L.) con mayores contenidos de sacarosa, que también se vio reflejado con la inoculación de *R. irregularis* en el cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (Zhao et al., 2019) y el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) (Zhu et al., 2018).

Correlaciones de Pearson

A continuación, se presenta la correlación de Pearson para la totalidad de los datos, sin discriminar variedad y para tener una idea general de la caña de azúcar para panela

(Figura 19). Cabe resaltar que *Acaulospora mellea* presentó correlación positiva con los azúcares reductores, la humedad y la temperatura, para el caso de *Rhizophagus irregularis* se presentó correlación lineal positiva con el fósforo soluble y azúcares reductores, el tratamiento control sin inoculación no presentó correlaciones positivas y el tratamiento control del 100% de fertilización con correlaciones lineales positivas con el pH, sacarosa y pureza.

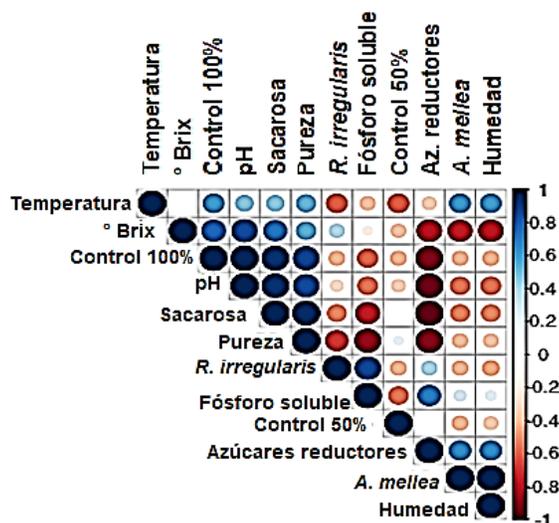


Figura 19. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar para panela. Color azul en mayor intensidad corresponde a correlación positiva, color rojo en mayor intensidad corresponde a correlación negativa.

Se realizó correlación de los parámetros fisicoquímicos y los tratamientos evaluados de la variedad CC 93-7711 (Figura 20). *Acaulospora mellea* presentó correlación positiva con la humedad, los azúcares reductores, la humedad, grados brix y el pH, para el caso de *Rhizophagus irregularis* se presentó correlación lineal positiva con el fósforo soluble, sacarosa y temperatura, el tratamiento control sin inoculación no presentó correlaciones positivas y el tratamiento control del 100% de fertilización con correlaciones lineales positivas con el pH, sacarosa, temperatura y grados brix.

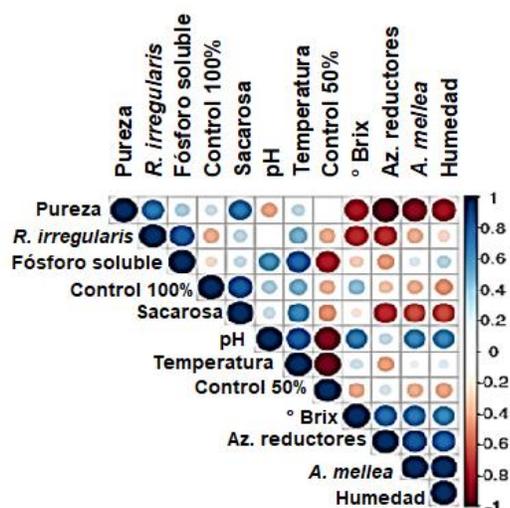


Figura 20. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar variedad CC 93-7711. Color azul en mayor intensidad corresponde a correlación positiva, color rojo en mayor intensidad corresponde a correlación negativa.

Se realizó la correlación de Pearson de los parámetros fisicoquímicos y los tratamientos aplicados en la variedad CC 93-7510 (Figura 21). *Acaulospora mellea* presentó correlación positiva con la humedad, para el caso de *Rhizophagus irregularis* se presentó correlación lineal positiva con el fósforo soluble, sacarosa y temperatura, el tratamiento control sin inoculación no presentó correlaciones positivas y el tratamiento control del 100% de fertilización correlaciones lineales positivas con el pH, sacarosa, temperatura y grados brix.

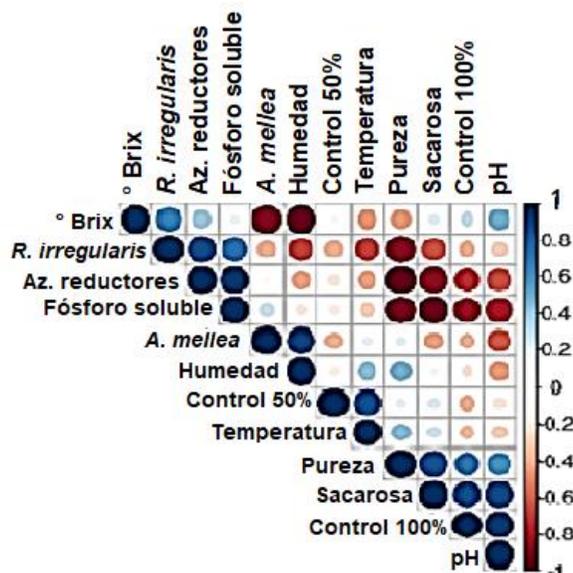


Figura 21. Correlación de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar variedad CC 93-7510. Color azul en mayor intensidad corresponde a correlación positiva, color rojo en mayor intensidad corresponde a correlación negativa.

Análisis de correspondencia canónica

El análisis de correspondencia canónica permite establecer la relación entre cada uno de los parámetros fisicoquímicos de panela, los HFMA inoculados y los tratamientos aplicados.

Los resultados indican que el análisis de correspondencia canónica (ACC) que establece la relación entre las características fisicoquímicas de panela para los tratamientos analizados y los HFMA, explica en el 89,7% de la varianza total, y se ilustra en la Figura 22. Destacándose la relación estrecha entre *A. mellea* con los azúcares reductores y la humedad. Así como la relación entre *R. irregularis* y el fósforo soluble, los grados brix y la sacarosa en panela.

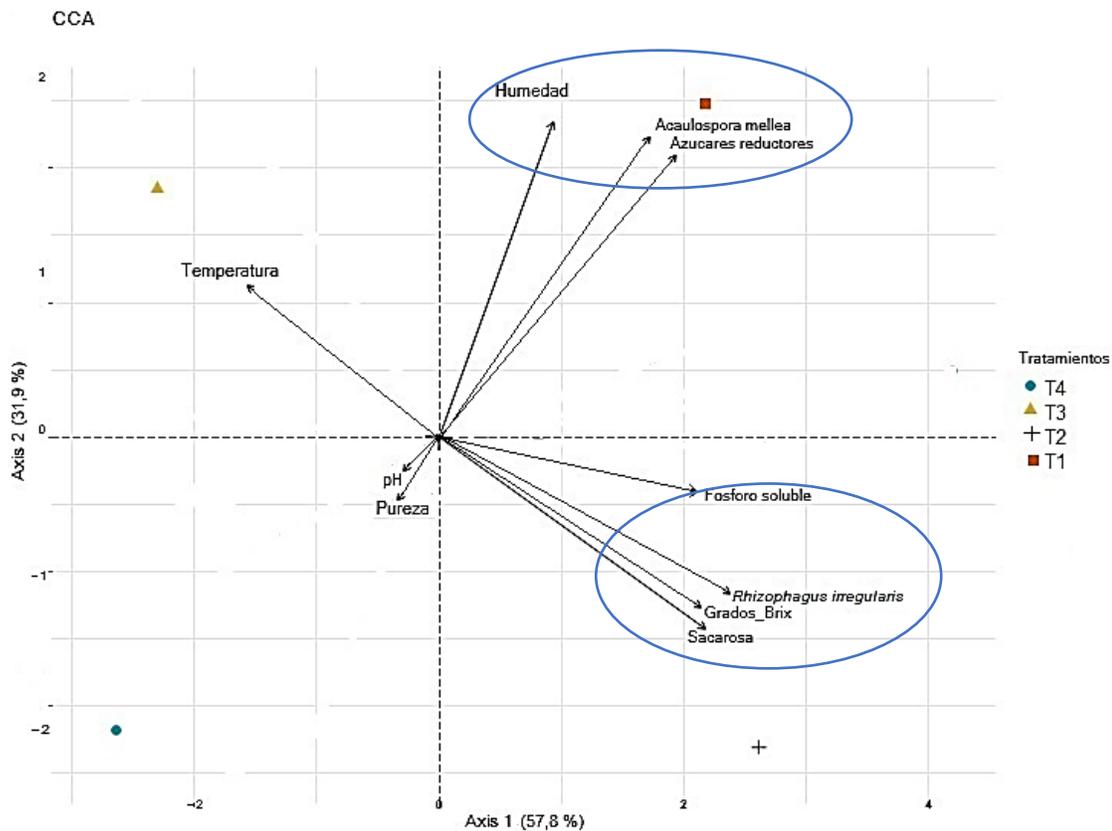


Figura 22. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en caña de azúcar en relación con la inoculación de HFMA. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química.

Para la variedad CC 93-7711 se observó un 90.7 % de la varianza total destacando que *A. mellea* se relaciona con la humedad y la temperatura en la panela, mientras que *R. irregularis* se relaciona con los grados brix en esta variedad (Figura 23).

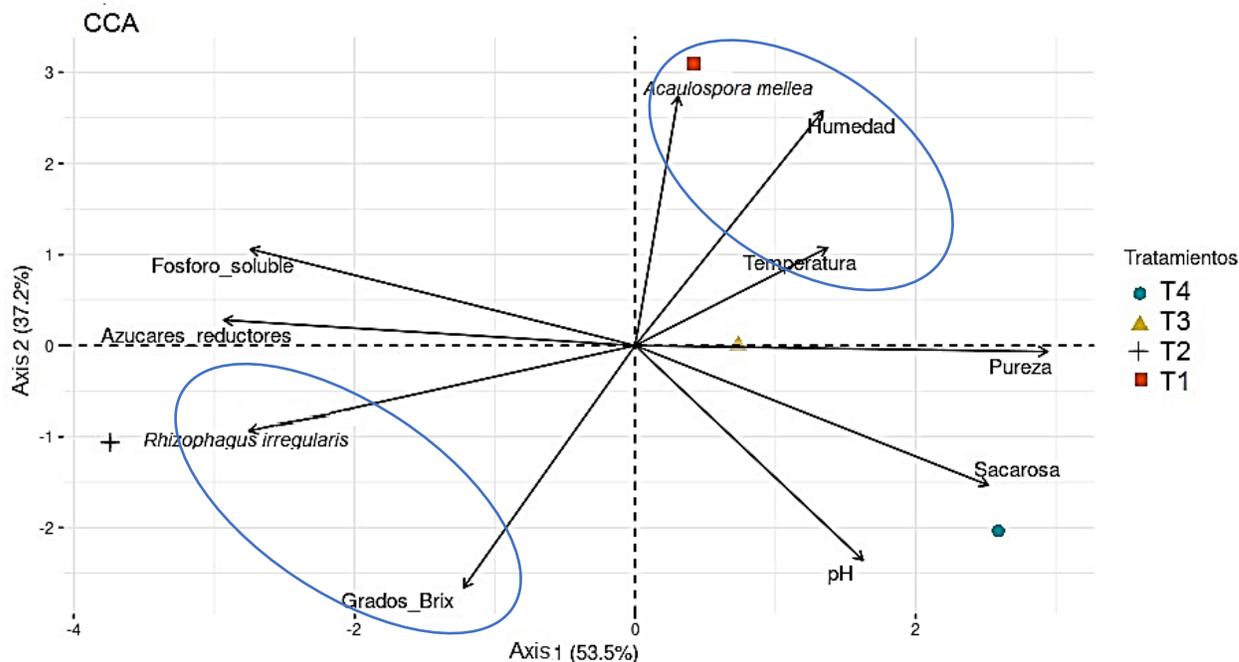


Figura 23. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en la variedad de caña de azúcar CC 93-7711 en relación con la inoculación de HFMA. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química.

Para la variedad CC 93-7510 se observó un 85.3 % de la varianza total destacando que *A. mellea* se relaciona con los grados brix, la humedad y el pH en la panela, mientras que *R. irregularis* se relaciona con la pureza, sacarosa, fósforo soluble, y temperatura en esta variedad (Figura 24).

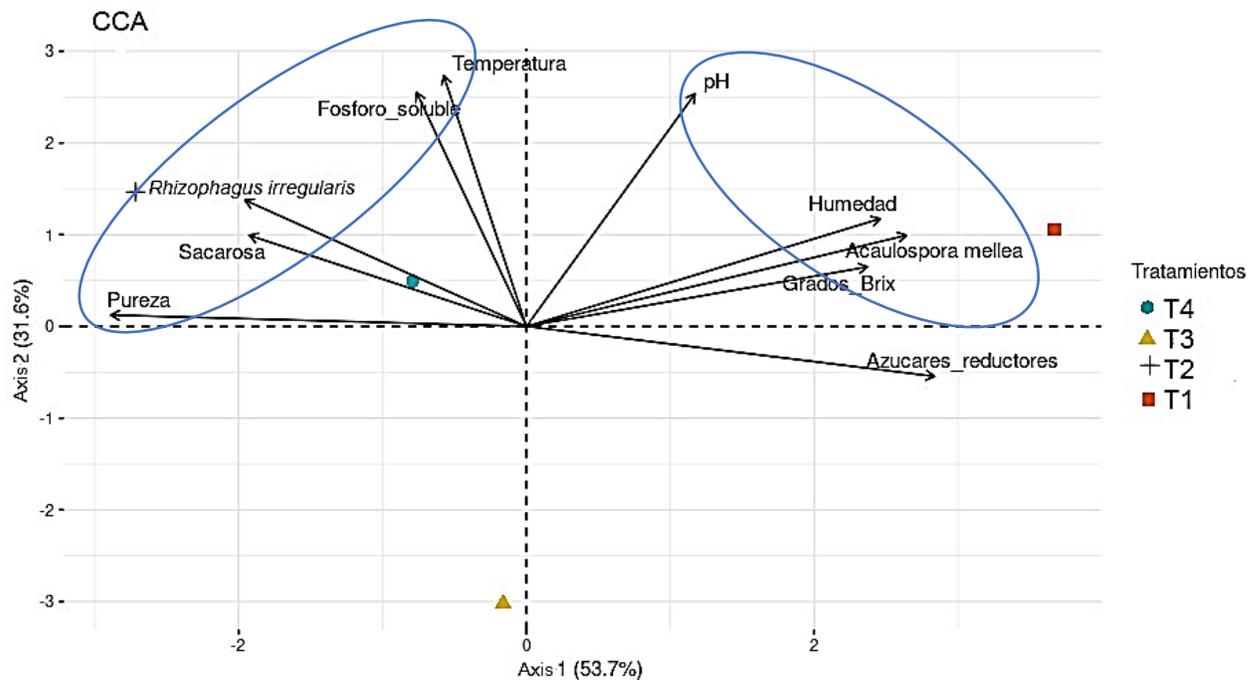


Figura 24. Análisis de correspondencia canónica general de las Características fisicoquímicas de panela en la variedad de caña de azúcar CC 93-7510 en relación con la inoculación de HFMA. T1: *A. mellea*, T2: *R. irregularis*, T3: Control Sin inoculación, T4: Control 100% Fertilización Química.

Conclusiones

Se logró un mayor rendimiento en panela con *A. mellea* en la variedad CC 93-7711 y con *R. irregularis* en la variedad CC 93-7510. Se destaca en el cultivo de la caña de azúcar la asociación a calidad en panela de fósforo soluble, sólidos totales y pureza atribuibles a *R. irregularis*, y la humedad y azúcares reductores a *A. mellea*. La variedad puede influir en que se exprese en mayor o menor medida estos atributos en panela pudiéndose presentar variaciones entre los microorganismos y su asociación en determinados parámetros de calidad.

Existe respuesta positiva a la inoculación con HFMA en la variedad CC 93-7711 en donde *R. irregularis* obtuvo un mayor índice de madurez, TCH y TCP, mientras que *A. mellea* tuvo una mayor conversión a panela. En la variedad CC 93-7510 la inoculación con *A. mellea* obtuvo valores más altos de índice de madurez, TCH y TPH, y *R. irregularis* valores más altos de conversión a panela.

La calidad en panela de la variedad CC 93-7711 obtuvo valores más altos en azúcares reductores, fósforo soluble y sólidos totales en la inoculación con *A. mellea*. En la variedad CC 93-7510 valores más altos en pureza y fósforo soluble con *A. mellea* y para la inoculación con *R. irregularis* mayor valor para humedad, sólidos totales y azúcares reductores.

Las correlaciones indican a nivel general interacción de *A. mellea* con la humedad y azúcares reductores, y de *R. irregularis* con los sólidos totales, pureza y fósforo soluble de panela. En la variedad CC 93-7711 se destaca que *A. mellea* interactúa con la humedad y temperatura *R. irregularis* con los sólidos totales. En la variedad CC 93-7510 se evidenció que *A. mellea* interactúa con la humedad, sólidos totales y pH, *R. irregularis* con fósforo soluble, pureza, sacarosa y temperatura.

Recomendaciones

Es necesario continuar con estudios del uso de estos HFMA inoculados en mezcla y con otros microorganismos como por ejemplo las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV).

Se requiere la multiplicación de estos HFMA a gran escala para poder brindar esta tecnología a los productores de caña panelera.

Este trabajo de investigación se convierte en una base para posteriores investigaciones del atributo de estos microorganismos y su contribución en la calidad de los alimentos.

Referencias bibliográficas

- Agrosavia. (2021a). *Caña de azúcar CC 93-7711 Pierna Bella*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36859>
- Agrosavia. (2021b). *Caña de azúcar CC93-7510 Vende finca*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36858>
- Asikin, Y., Kamiya, A., Mizu, M., Takara, K., Tamaki, H., & 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>
- Barry, K., Abobaker, A., Mohammed, R., Mohamed, H., Bound, S., Glen, M., Swarts, N., & Measham, P. (2017). Exploring functional applications of arbuscular mycorrhizal fungi in sweet cherry and links to fruit quality. *9th International Conference on Mycorrhiza*, 19. <http://ecite.utas.edu.au/125444>
- Barthole, G. (2018). «Jamais seul»: Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations (Marc-André Selosse). *Medecine/Sciences*, *34*(6–7), 604–607. <https://doi.org/10.1051/medsci/20183406023>
- Baslam, M., Pascual, I., Sánchez-Díaz, M., Erro, J., & García-Mina, J. M. Goicoechea, N. (2011). Improvement of nutritional quality of greenhouse-grown lettuce by arbuscular mycorrhizal fungi is conditioned by the source of phosphorus nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59* (20), 11129-11140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/jf202445y>
- Chavarria, D. N., Pérez-Brandan, C., Serri, D. L., Meriles, J. M., Restovich, S. B., Andriulo, A.

- E., Jacquelin, L., & Vargas-Gil, S. (2018). Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 264(September), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.008>
- Chinnadurai, C. (2017). Potential health benefits of sugarcane. In *Sugarcane Biotechnology: Challenges and Prospects* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58946-6>
- CORPOICA. (2004). Composición de panela en bloque de acuerdo con muestras tomadas en diferentes regiones del país. Análisis realizados en laboratorios de CORPOICA-CIMPA entre 1988 y 2004. In *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Centro de investigación Tibaitatá*.
- Datta, P., & 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>
- De Almeida, M. A., & Colombo, R. (2021). Production Chain of First-Generation Sugarcane Bioethanol: Characterization and Value-Added Application of Wastes. *BioEnergy Research*. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10301-4>
- Dos Santos, R. S., Ferreira, J. S., & Scoriza, R. N. (2017). Inoculum production of arbuscular mycorrhizal fungi native to soils under different forest covers. *Revista Ceres*, 64(2), 197–204. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764020013>
- Durán Castro, N. (2010). Reingeniería panelera. *Editorial Produmedios*, 1, 244. <https://isbn.cloud/9789584475770/reingenieria-panelera/>
- Ehsanipour, A., Abbasdokht, H., Gholipour, M., & 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.iauahvaz.ac.ir/article-1-1190-en.html>
- Endres, L., Dos Santos, C. M., de Souza, G. V., Menossi, M., & dos Santos, J. C. M. (2018). Morphological changes recorded in different phenophases of sugarcane plants subjected to water stress in tropical field conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(7), 1041–1050. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.07.PNE780>
- FAO. (1994). *Definition and Classification of Commodities. Sugar Crops and Sweeteners and Derived Products*.
- FAO. (2018). *Base de datos balance alimentario. FAOSTAT*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Fors, R. O., Saggin Júnior, O. J., Carneiro, M. A. C., & 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, 1–11. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42477>
- Ge, Y., Li, K., Xie, C., Xu, Y., Shi, C., Hang, F., & Doherty, W. O. S. (2021). Formation of volatile and aroma compounds during the dehydration of membrane-clarified sugarcane juice to non-centrifugal sugar. *Foods*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/foods10071561>
- 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)

- Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M. N., van Tuinen, D., Redecker, D., & Wipf, D. (2010). Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. In *Mycorrhiza* (Vol. 20, Issue 8, pp. 519–530). <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3>
- González Chavarro, F., Cabezas Gutiérrez, M., Ramírez-Gómez, M., & Durán, J. R. (2018). Macronutrient absorption curves in three varieties of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) for panela in the 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>
- Guamán, E. F., Guamán, F. R., & Villavicencio, H. (2007). *Diseño, simulación y emulación de una planta productora de panela*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1045/1/1929.pdf>
- Gupta, S., Thokchom, S. D., & Kapoor, R. (2021). Arbuscular Mycorrhiza Improves Photosynthesis and Restores Alteration in Sugar Metabolism in *Triticum aestivum* L. Grown in Arsenic Contaminated Soil. *Frontiers in Plant Science*, 12, 334. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.640379>
- Gupta, V. V., & Germida, J. J. (2015). Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, A3–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Harper, C. J., Taylor, T. N., Krings, M., & Taylor, E. L. (2013). Mycorrhizal symbiosis in the Paleozoic seed fern *Glossopteris* from Antarctica. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 192, 22–31. <https://doi.org/10.1016/J.REVPALBO.2013.01.002>
- ICBF., & FAO. (2020). Documento técnico. Guías Alimentarias Basadas en Alimentos para la

Población Colombiana Mayor de 2 años. In *ICBF*.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/guias-alimentarias-basadas-en-alimentos.pdf>

Insuasty Burbano, O. I., Rodríguez Barona, A. F., Lopera, L., Gonzalo, J., Chamorro, R., & Ramírez Durán, J. (2018). CC 93-7711 Pierna Bella/variedad de caña de azúcar para producción de panela para las zonas naturales de la hoyra del río Suárez, Montaña Antioqueña, Montaña Santandereana y departamentos de Cundinamarca y Tolima. In *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)*.

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>

Jaffé, W. R. (2015). Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis*, *43*, 194–202. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2015.06.007>

Jan, B., Sharif, M., Khan, F., & 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*, *05*(13), 1995–2004. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.513213>

Ji, V. k. (2013). *Catálogo de variedades de caña de azúcar*.

Juntahum, S., Jongrunklang, N., Kaewpradit, W., Ekprasert, J., & 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., Jongrungklang, N., Kaewpradit, W., Lumyong, S., & 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>
- Kumar, A., Danish Yaseen Naqvi, S., Kaushik, P., Khojah, E., Amir, M., Alam, P., & Samra, B. N. (2022). Rhizophagus irregularis and nitrogen fixing azotobacter enhances greater yam (*Dioscorea alata*) biochemical profile and upholds yield under reduced fertilization. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3694–3703. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.041>
- Lane, J. H., & Eynon, L. (1923). Volumetric determination of reducing sugars by means of Fehling's solution, with methylene blue as internal indicator. *Int. Sug.*, 25, 143–149.
- Lee, J. S., Ramalingam, S., Jo, I. G., Kwon, Y. S., Bahuguna, A., Oh, Y. S., Kwon, O. J., & Kim, M. (2018). Comparative study of the physicochemical, nutritional, and antioxidant properties of some commercial refined and non-centrifugal sugars. *Food Research International*, 109(December 2017), 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.047>
- Manrique, R. (2000). Suelos , Nutrición Y Fertilización De La Caña De. In *Manual de caña de azúcar para la elaboración de panela* (p. 16). Corpoica–Fedepanela. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1934/39747_23890.pdf?sequence=1
- MinAgricultura., MinSalud., MinCIT., MinEducación., M., MinVivienda., DPS., ICBF., ICA., & DNP. (2012). Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (PNSAN) 2012 -2020.

Versión Aprobada Por La Comisión Intersectorial de Seguridad Alimentaria y Nutricional,
68. <http://www.osancolombia.org/doc/pnsan.pdf>

MinAgricultura. (2021). Cadena agroindustrial de la panela PECTIA. 2021, 0–30.

Minsalud. (2009). *RESOLUCIÓN 3544 DE 2009. Modificación de los artículos 11 y 13 de la Resolución 779 de 2006.*
https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minproteccion_3544_2009.htm

MinSalud. (2006). *RESOLUCION NÚMERO 000779 DE 2006* (Vol. 2006, Issue Marzo 17).
Reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para consumo humano y otras disposiciones.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolucion-779-de-2006.pdf>

MinSalud. (2008). *Resolución Número 3462 de 2008.* 2008(Septiembre 11), 1–2.
http://www.invima.gov.co/images/stories/resoluciones/resolucion3462_sept2008.pdf

MinSalud. (2013). *RESOLUCIÓN 4217 de 2013. Modificación de la Resolución 3544 de 2009.* 2012–2013.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4217-de-2013.pdf>

Noceto, P.-A., Bettenfeld, P., Bousageon, R., Hériché, M., Sportes, A., van Tuinen, D., Courty, P.-E., & Wipf, D. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi, a key symbiosis in the development of quality traits in crop production, alone or combined with plant growth-promoting bacteria. *Mycorrhiza*, 31(6), 655–669. <https://doi.org/10.1007/s00572-021-01054-1>

- Núñez, L. (2020). *Estrategia tecnológica en la etapa de la molienda de producción de panela de los pequeños productores de la Hoya del Río Suárez* [Universidad Distrital de Colombia]. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25706>
- Qiang-Sheng, W., Ming-Qin, C., Ying-Ning, Z., Chu, W., & Xin-Hua, H. (2016). Mycorrhizal colonization represents functional equilibrium on root morphology and carbon distribution of trifoliolate orange grown in a split-root system. *Scientia Horticulturae*, 199, 95–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.039>
- Ramirez Duran, J. (2014). *Variedad CC 93-7510 :variedad de caña de azúcar (Saccharum spp.)* (p. 6). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/20711>
- 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. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 183–195. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:358
- Ramírez, J. G., Osorno, L., & Osorio, N. W. (2016). Presencia de hongos micorrízales y una *Pseudomonas* sp. Fluorescente en la rizosfera de cacao en agroecosistemas y sus efectos en el crecimiento de plántulas de cacao. *Agronomía Colombiana*, 34(3), 385–392. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.57950>
- Rupe, S. S. (2007). Chapter - 2 Processing of jaggery. In U. Shivaji (Ed.), *QuotGrowth and prospect of jaggery industry in Kolhapur district of Maharashtra statequot*. (pp. 28–30).
- Samano, M. (2014). *Efecto de un consorcio de hongos micorrízicos arbusculares de una zona geotérmica en maíz, bajo estrés hídrico* [Instituto Politécnico nacional - IPN].

<http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/12787>

Sawers, R. J. H., Svane, S. F., Quan, C., Grønlund, M., Wozniak, B., Gebreselassie, M.-N., González-Muñoz, E., Chávez Montes, R. A., Baxter, I., Goudet, J., Jakobsen, I., & Paszkowski, U. (2017). Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. *The New Phytologist*, *214*(2), 632–643. <https://doi.org/10.1111/nph.14403>

Schubert, R., Werner, S., Cirka, H., Rödel, P., Moya, Y. T., Mock, H. P., Hutter, I., Kunze, G., & Hause, B. (2020). Effects of arbuscular mycorrhization on fruit quality in industrialized tomato production. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(19), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijms21197029>

Shao, Y. D., Zhang, D. J., Hu, X. C., Wu, Q. S., Jiang, C. J., Gao, X. B., & Kuča, K. (2019). Arbuscular mycorrhiza improves leaf food quality of tea plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *47*(3). <https://doi.org/10.15835/nbha47311434>

Soria Martínez, F. L. (2012). *Calidad y Rendimiento de Fresa Inoculada con Hongos Micorrízicos Arbusculares* [Instituto Politécnico nacional - IPN]. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/12270>

Sorol, N., Zossi, S., Ruiz, M., & Saska, M. (2019). *Validation and application of the colorimetric method of phosphates in sugarcane and sweet sorghum juice*. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182019000100004&lng=en&tlng=en

- Sulistiono, W., Taryono, T., Yudono, P., & Irham, I. (2017). Early-Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Application Improved Physiological Performances of Sugarcane Seedling and Further Growth in the Dry Land. *Journal of Agricultural Science*, 9(4), 95. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n4p95>
- Velásquez, F., Espitia, J., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2019). Non-centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process variables on qualities attributes of final products. *Journal of Food Engineering*, 255(March), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009>
- Viveros Valens, C. A. (2011). Identificación de características asociadas con la mayor eficiencia en el uso del agua para la producción de caña de azúcar. [UNiversidad Nacional de Colombia]. In *Tesis para optar a Doctor en Ciencias Agropecuarias*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9049>
- Volverás-Mambuscay, B., González-Chavarro, C. F., Huertas, B., Kopp-Sanabria, E., & Ramírez-Durán, J. (2020). Effect of the organic and mineral fertilizer on the performance of sugarcane yield in Nariño, Colombia. *Agronomy Mesoamerican*, 31(3), 547–565. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I3.37334>
- Weerawatanakorn, M., Asikin, Y., Kamchonemenukool, S., Tamaki, H., Takara, K., & Wada, K. (2021). Physicochemical, antioxidant, volatile component, and mass spectrometry-based electronic nose analyses differentiated unrefined non-centrifugal cane, palm, and coconut sugars. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 1563–1577. <https://doi.org/10.1007/S11694-020-00749-X>

- Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolon, A. M., & 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>
- Zhao, S., Chen, A., Chen, C., Li, C., Xia, R., & Wang, X. (2019). Transcriptomic analysis reveals the possible roles of sugar metabolism and export for positive mycorrhizal growth responses in soybean. *Physiologia Plantarum*, *166*(3), 712–728. <https://doi.org/10.1111/ppl.12847>
- Zhu, X., Song, F., Liu, S., Liu, F., & Li, X. (2018). Arbuscular mycorrhiza enhances nutrient accumulation in wheat exposed to elevated CO₂ and soil salinity. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, v. *181*(6), 836-846–2018 v.181 no.6. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700575>