



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Dinámica del calcio en suelos con alta saturación de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca

Juan Sebastian Martinez Olaya

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ciencias agropecuarias
Palmira, Colombia

2024

Dinámica del calcio en suelos con alta saturación de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca

Juan Sebastian Martinez Olaya

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en ciencias agrarias

Director (a):

Ph.D., Ramiro Ramirez Pisco

Línea de Investigación:

Suelos

Grupo de Investigación: Agroxue

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ciencias agropecuarias
Palmira, Colombia

2024

(Dedicatoria)

*A mi Dios, mi familia, mis tres padres, mis
hermanos y sobrinos. A mi pareja y a mi eterna
Toli. A las raíces de mi tierra.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre

Fecha DD/MM/AAAA

Fecha

Agradecimientos

Al Ingenio Risaralda. Al director de campo, el ingeniero Juan José Uribe; los jefes de la zona 4, Jorge Tabares y Natalia Arias; a las jefes de Agronomía, Andrea Calderón y Laura Ramirez; al jefe de Logística de Distribución, Alejandro Patiño. Estas personas creyeron y apoyaron esta idea de investigación con todo su corazón.

A mi director de tesis Ramiro Ramirez Pisco y a la doctora Edna Leiva Rojas, por aceptar y guiar con su conocimiento este proyecto.

Toda la fase de campo fue posible gracias al personal de la cuadrilla de Agronomía, quienes con su apoyo incondicional materializaron este trabajo. A don Leo, don Jaime, don Henry y don Bairon, muchísimas gracias.

A mi pareja Alejandra Hurtado, quién me apoyó, alentó, toleró y aconsejó durante los días y noches dedicados en este documento.

A Luisa Aguirre, quien en su periodo de pasantía fue esencial en la toma de datos. A Jorge Medina, Edgar Hincapié y Francisco Sanguino, gracias por su colaboración.

A los que me han apoyado y han llenado mi vida con su amor, mi mamá Amira Olaya, mi papá Fernando Martinez, mi mamá Chavela, mis hermanos Cristian y Luisa Martinez Olaya, mis sobrinos Sara, Samuel, Salomé y Thiago.

A mis amigos de oficina, quienes sienten propio este logro académico.

Mil gracias a ustedes y por supuesto a mi Dios, quien fue que los puso en mi camino.

Resumen

Dinámica del calcio en suelos con alta saturación de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca

En el valle geográfico del río Cauca, cerca de 117.000 hectáreas se encuentran afectadas por el exceso de magnesio en el suelo, en ese sentido, su manejo tradicional sigue el principio similar a la gestión del sodio: incrementar los niveles de calcio. Con el objetivo de estudiar la dinámica del calcio en suelos con alta saturación de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar ubicados en el norte del Valle del Cauca, se desarrollaron tres experimentos en el Ingenio Risaralda: dos en campo (plantillas y socas) bajo un diseño experimental de Bloques Completos al Azar (BCAA) y uno bajo condiciones controladas (contenedores) en un diseño Completamente al Azar (CAA). Se aplicaron siete tratamientos en 5 repeticiones para un total de 35 unidades experimentales. Se evaluó el efecto de dos enmiendas (yeso y carbonato de calcio) y tres dosis correspondientes a 1.5; 3; y 4.5 toneladas por hectárea. Se midieron variables de crecimiento, toneladas de caña por hectárea (TCH), acumulación de sacarosa (%), toneladas de azúcar por hectárea (TAH), materia seca (g), contenido de nutrientes en el suelo y el tejido foliar, y parámetros físicos asociados a la estructura del suelo (densidad aparente, porosidad, infiltración, resistencia a la penetración y sólidos suspendidos en la solución). Los resultados evidencian un incremento del crecimiento y la productividad con la aplicación de carbonato de calcio, sin embargo, el yeso no presentó diferencias significativas respecto al testigo. Por otra parte, la aplicación de enmiendas favoreció la acumulación de calcio y azufre en el suelo y en el tejido, mientras que las propiedades físicas asociadas a la estructura mejoraron sustancialmente con la aplicación del yeso y en menor grado con el carbonato.

Palabras clave: carbonato de calcio; yeso; magnesio; calcio; caña de azúcar.

Abstract

Calcium dynamics in soils with high magnesium saturation dedicated to sugarcane production in northern Valle del Cauca.

In the geographic valley of the Cauca River, around 117,000 hectares are affected by excess magnesium in the soil, in that sense, its traditional management follows the principle similar to sodium management: increase calcium levels. With the objective of studying calcium dynamics in soils with high magnesium saturation dedicated to sugarcane production located in the northern part of Valle del Cauca, three experiments were developed at the Ingenio Risaralda S.A : two in the field (templates and socas) under a Randomized Complete Block experimental design (BCAA) and one under controlled conditions (containers) in a Completely Randomized design (CAA). Seven treatments were applied in 5 replications for a total of 35 experimental units. The effect of two amendments (gypsum and calcium carbonate) and three doses corresponding to 1.5; 3; and 4.5 tons per hectare were evaluated. Growth variables, tons of cane per hectare (TCH), sucrose accumulation (%), tons of sugar per hectare (TAH), dry matter (g), nutrient content in soil and leaf tissue, and physical parameters associated with soil structure (bulk density, porosity, infiltration, penetration resistance and suspended solids in solution) were measured. The results show an increase in growth and productivity with the application of calcium carbonate; however, gypsum did not show significant differences with respect to the control. On the other hand, the application of amendments favored the accumulation of calcium and sulfur in the soil and in the tissue, while the physical properties associated with the structure improved substantially with the application of gypsum and to a lesser degree with carbonate.

Key words: calcium carbonate; gypsum; magnesium; calcium; sugarcane.

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	X
Abstract	XI
Contenido	XII
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
Introducción	19
1. Hipótesis	23
2. Planteamiento del problema	25
3. Objetivos	27
3.1 Objetivo general	27
3.2 Objetivos específicos	27
4. Justificación	29
5. Marco teórico	33
5.1 Efecto de los cationes sobre el suelo	34
5.1.1 Efecto del calcio en el suelo.....	34
5.1.2 Efecto del sodio en el suelo	35
5.1.3 Efecto del exceso de magnesio	35
5.2 Condiciones asociadas a la baja productividad de la caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca	35
5.2.1 Suelos con alto contenido de magnesio.....	35
5.2.2 Reducción del calcio y su relación con los cationes.....	37
5.2.3 Suelos con alto contenido de sodio.....	39
5.2.4 Suelos sulfatados ácidos	40
5.3 Estrategias agronómicas para el manejo del suelo en el Norte del Valle del Cauca	40
5.3.1 Uso del yeso.....	40
5.3.2 Uso del carbonato de calcio.....	41
6. Metodología	43
6.1 Localidades de estudio.....	43
6.1.1 Investigación en campo (experimento 1): dinámica del calcio en plantillas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas)	45
6.1.2 Investigación en campo (experimento 2): dinámica del calcio en socas de la variedad CC 05-430 (hacienda la Estrella)	47
6.1.3 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430	50
6.2 Diseño experimental.....	51

6.2.1 Investigación en campo (experimento 1 y 2): dinámica del calcio en plantillas y socas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas y Estrella).....	51
6.2.2 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430	55
6.3 Conducción del experimento	57
6.3.1 Investigación en campo (experimento 1): dinámica del calcio en plantillas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas)	57
6.3.2 Investigación en campo (experimento 2): dinámica del calcio en socas de la variedad CC 05-430 (hacienda Estrella).....	61
6.3.3 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430	63
7. Resultados y discusión	67
7.1 Experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas).....	67
7.1.1 Grupo de variables asociados al crecimiento y a la productividad	67
7.1.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar	70
7.1.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo	74
7.1.4 Propiedades químicas del suelo	80
7.1.5 Rentabilidad económica del experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas)...	82
7.1.6 Correlación de variables del experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas)	83
7.2 Experimento 2: socas (hacienda la Estrella)	85
7.2.1 Grupo de variables asociadas al crecimiento y a la productividad	85
7.2.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar.....	87
7.2.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo	90
7.2.4 Propiedades químicas del suelo	95
7.2.5 Rentabilidad económica del experimento 2: socas (hacienda la Estrella)	97
7.2.6 Correlación de variables del experimento 2: socas (hacienda la Estrella).....	98
7.3 Experimento 3: condiciones controladas (Contenedores).....	100
7.3.1 Grupo de variables asociadas al crecimiento (número de macollas; altura y diámetro de la yagua; y longitud de la raíz), distribución y acumulación de materia seca (hoja; yagua; tallo; y raíz).....	100
7.3.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar.....	107
7.3.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo	110
7.3.4 Grupo de variables asociadas a las propiedades químicas del suelo	120
7.3.5 Correlación de variables del experimento 3: contenedores bajo condiciones controladas.....	122
Conclusiones.....	123
A. Anexo: descripción del perfil las Arditas (plantillas).....	124
B. Anexo: descripción del perfil La Estrella (socas)	126
C. Anexo: Coeficientes de correlación del experimento 1; plantillas (hacienda las Arditas)	128
D. Anexo: coeficientes de correlación del experimento 2; socas (hacienda la Estrella).....	132
E. Anexo: Coeficientes de correlación del experimento 3; Contenedores bajo condiciones controladas	136

F. Anexo: Costos fijos y variables de los tratamientos.	140
Referencias.....	143

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 5-1: Distribución geográfica de la concentración de MgO en sedimentos en Colombia.	36
Figura 5-2: Reducción del contenido de calcio y la relación Ca:Mg en el Ingenio Risaralda en los últimos 23 años.	37
Figura 5-3: a) Deficiencia de calcio en hojas maduras. b) Deficiencia de calcio en plántulas.	39
Figura 6-1: Áreas de estudio: a) Experimento 1: Plantillas (hacienda Las Arditas). b) Experimento 2: socas (hacienda Estrella). c) Experimento 3: (Ingenio Risaralda-Virginia).	44
Figura 6-2: a) Zonificación agroecológica. b) Perfil Arditas (<i>Vertic Haplustolls</i>). c) Agrietamiento.	45
Figura 6-3: a) Zonificación agroecológica. b) Perfil la Estrella (<i>Typic Haplusterts</i>). c) Agrietamiento. d) Daño mecánico en raíces por la contracción del suelo.	47
Figura 6-4: Distribución de los contenedores en el área experimental.	50
Figura 6-5: Distribución de bloques en función de la variabilidad de arcilla. a) Experimento 1 (plantillas). b) Experimento 2 (socas).	52
Figura 6-6: Conducción del experimento.	59
Figura 6-7. Diagrama de flujo de la soca.	62
Figura 6-8: Descripción gráfica de los órganos medidos.	64
Figura 6-9: Resumen del proceso del experimento 3 (contenedores).	65
Figura 7-1: Distribución de los nutrientes en el tejido por tratamiento de la plantilla y su relación con el nivel óptimo reportado por Cenicaña (2022).	73

Figura 7-2. a) Distribución de la densidad aparente (g.cm^{-3}). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente (g.cm^{-3}). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).	74
Figura 7-3: Resistencia a la penetración en plantillas.	76
Figura 7-4: Sólidos suspendidos: a) Distribución de la densidad de la solución (g.cm^{-3}). b) Prueba de medias. c) Precipitación de los sólidos en función al tiempo.	78
Figura 7-5: Curvas de retención de humedad plantilla.	79
Figura 7-6: describe gráficamente la distribución de los nutrientes por tratamiento y su comparación con el nivel óptimo de referencia reportado por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430.	89
Figura 7-7. a) Distribución de la densidad aparente (g.cm^{-3}). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente (g.cm^{-3}). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).	90
Figura 7-8: Resistencia a la penetración en socas.	92
Figura 7-9: Sólidos suspendidos en socas. a) Distribución de la densidad de la solución (g.cm^{-3}). b) Prueba de medias (g.cm^{-3}). c) Precipitación de los sólidos en función al tiempo (g.cm^{-3}).	93
Figura 7-10: Curvas de retención de humedad soca.	94
Figura 7-11: Crecimiento: a) Altura de yaguas. b) Número de macollas. c) Diámetro de yaguas.	102
Figura 7-12: Distribución de la materia seca (%) por órgano en función a la aplicación de enmiendas.	105
Figura 7-13: Desarrollo del Calcio ¹ en comparación del testigo.	106
Figura 7-14: Distribución de los nutrientes en el tejido por tratamiento en los contenedores y su relación con el nivel óptimo reportado por Cenicaña (2022).	109
Figura 7-15. a) Distribución de la densidad aparente (g.cm^{-3}). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente (g.cm^{-3}). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).	111
Figura 7-16: Velocidad de infiltración por tratamiento.	112
Figura 7-17: a) Distribución de la infiltración (mm.h^{-1}). b) Prueba de medias para la infiltración básica (mm.h^{-1}).	113
Figura 7-18: a. Resistencia a la penetración.	114
Figura 7-19: a) Distribución de la humedad gravimétrica (%) en el momento de la lectura de RP. b) prueba de medias para la humedad gravimétrica. c. Humedad volumétrica de todo el ciclo.	115
Figura 7-20: Sólidos suspendidos por tratamiento.	116
Figura 7-21: Sólidos suspendidos en los contenedores bajo condiciones controladas: a. Distribución de la densidad de la solución (g.cm^{-3}). b. Prueba de medias. c. Precipitación de los sólidos en función al tiempo.	118
Figura 7-22: Curvas de retención de humedad.	119

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 5-1: Relaciones generales para el buen desarrollo agrícola.....	38
Tabla 5-2: Concentración de bases y saturaciones para el buen desarrollo agrícola.	38
Tabla 6-1: Características químicas del suelo (hacienda Arditas).	46
Tabla 6-2: Características químicas del suelo (hacienda la Estrella).....	49
Tabla 6-3: Descripción de los grupos de variables medidas.....	53
Tabla 6-4: Técnicas y métodos para la determinación de variables.	56
Tabla 7-1: Comparación de medias de las variables asociadas al crecimiento y a productividad (TCH: toneladas de caña por ha; TAH: toneladas de azúcar por ha).....	69
Tabla 7-2: Concentración de nutrientes en el tejido foliar en la plantilla.	72
Tabla 7-3: Propiedades químicas del suelo de la plantilla.	82
Tabla 7-4: Rentabilidad económica de la plantilla a la aplicación de calcio.	83
Tabla 7-5: Comparación de medias de las variables asociadas al crecimiento y a productividad.....	86
Tabla 7-6: Concentración de nutrientes en el tejido foliar en la soca.....	88
Tabla 7-7: Propiedades químicas del suelo de la soca.....	97
Tabla 7-8: Rentabilidad económica de la soca a la aplicación de calcio.....	98
Tabla 7-9: Crecimiento y producción de materia seca.....	100
Tabla 7-10: Concentración de los nutrientes en el tejido foliar	108
Tabla 7-11: Propiedades químicas del suelo de los contenedores.....	121

Introducción

La actividad de la caña de azúcar tiene un efecto significativo para la economía mundial, su desarrollo ideal se expresa en el trópico, es sembrada en varias latitudes que cubren una extensión aproximada de 26.3 millones de hectáreas (*World Food and Agriculture – Statistical Yearbook, 2022*), con una producción promedio anual de 172 millones de toneladas de azúcar (Asocaña, 2023).

Según el informe la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña, 2023), la agroindustria de la caña en Colombia representó en el 2021 un 2.5% del PIB agrícola, 1.9% del PIB industrial y el 0.6 % del PIB total. En ese sentido, Colombia es conocido como el país con mayor productividad de caña de azúcar por hectárea del mundo, además, por sus avances en productividad gracias a su innovación, investigación, desarrollo y transferencias tecnológicas lideradas por los Ingenios y su centro de investigación Cenicaña. Su área se concentra en los departamentos del Valle del Cauca, Cauca, Risaralda, Caldas y Quindío, distribuidas en 51 municipios, donde se cosecharon para el 2022 aproximadamente 182.670 hectáreas (Asocaña, 2023).

Con más de 150 años de actividad económica en el suroccidente colombiano en el Valle geográfico del río Cauca, la agroindustria de la caña de azúcar cuenta con 15 ingenios, 14 plantas productoras de azúcar, 7 destilerías y 15 plantas cogeneradoras de energía (Asocaña, 2023).

Para el 2022 el rendimiento del país cerró en un promedio de 117.8 toneladas de caña por hectárea (TCH) y 12.3 toneladas de azúcar por hectárea (TAH), ocupando el puesto 15 en el *ranking* de los países productores de azúcar de caña, con una producción de 2.2 millones de toneladas de azúcar al año; asimismo, ocupó el puesto número 11 entre los países exportadores con 700.000 toneladas al año (Asocaña, 2023).

Aun cuando Colombia continúa en el *ranking* de los 15 mayores productores y exportadores de azúcar del mundo, su participación no es significativa (1.3 %), como consecuencia de la alta participación de los mayores productores como Brasil, India, Unión Europea y China. No obstante, la actividad agroindustrial de la caña de azúcar en el 2022 generó en el país un gran desarrollo económico; 347 millones de litros de bioetanol, 1745 GWh de energía eléctrica cogenerada, 6.7 millones de toneladas de bagazo destinado a la producción de papel y energía eléctrica y 180 mil toneladas de miel final producida.

Si bien Colombia es reconocido como el país con mayor productividad de caña por unidad de área, debido a sus excelentes condiciones climáticas para el cultivo, suelos fértiles ricos en materia orgánica y nutrientes; ingenios ubicados en la parte norte presentan desbalances nutricionales asociados al exceso de magnesio.

Según el Servicio Geológico Colombiano (2020) esta zona reporta las mayores concentraciones de Mg de todo el territorio; esto trae como consecuencia que el potencial productivo de este tipo de suelos presente limitaciones por degradación de las propiedades físicas, representadas por procesos de dispersión de arcillas, oclusión de poros y sellamientos que limitan la movilidad del agua en el suelo (Mikkelsen, 2010; Trujillo, *et al*, 2004; Zade *et al*, 2017).

Las aguas y suelos con exceso de magnesio son ejemplos del deterioro de los recursos naturales, los reportes más relevantes sobre suelos con alto contenido de este catión se centran en el valle del río Cauca en Colombia, la cuenca de la meseta central en Irán, la cuenca del Indo en Pakistán, las llanuras indo-gangéticas en la India, la cuenca Murray-Darling en Australia y la Cordillera Costera de California, entre otros (Qadir M & De Pauw, 2007). Cerca de 117.000 hectáreas se encuentran afectadas en el valle geográfico del río Cauca (García-Ocampo, 2004); Madero *et al* (2004) reportan que uno de los transectos más representativos asociados a la acumulación de magnesio es el norte del Valle del Cauca.

Autores como Qadir *et al* (2018) indican que cuando la relación calcio:magnesio (Ca:Mg) es inferior a 1 y la saturación de magnesio con respecto a las bases totales del suelo supera el 25 %, se puede degradar el suelo e impactar negativamente la productividad agrícola de la región. En ese sentido, el valor ideal de la relación Ca:Mg para los suelos de la zona azucarera en Colombia es cercana a 2 (Quintero, 1995).

El manejo adecuado de suelos con alta saturación de magnesio tiene como principio aumentar la concentración de calcio en el complejo de cambio y su relación respecto a las demás bases (Karajeh *et al.*, 2004; Vyshpolsky *et al.*, 2008). Las aplicaciones comerciales de enmiendas ricas en calcio como fosfatos y sulfatos en este tipo de suelos son comunes por respuesta, sin embargo, el uso de carbonatos ha sido poco explorado.

Por otra parte, ingenios en Guatemala han estudiado el uso de enmiendas a base de sulfatos sobre varios órdenes con estas características, baja conductividad hidráulica e infiltración, alto coeficiente de contracción-Expansión y alta plasticidad, en él concluyen que la aplicación de sulfatos sobre vertisoles tiene un efecto significativamente mayor a otros ordenes como molisoles o Inceptisoles sobre las toneladas de caña por hectárea (TCH) (Perez *et al.*, 2003).

Del mismo modo, la investigación de especies vegetales adaptadas a las altas saturaciones de magnesio aún es muy resiente, no obstante, se han identificado mecanismos fisiológicos y evolutivos asociados al uso eficiente del calcio y el mantenimiento de los altos niveles de la relación Ca:Mg en los tejidos (Brady *et al.*, 2005).

El exceso de magnesio es un factor asociado a la degradación de los suelos, si bien, los reportes que existen demuestran una pérdida significativa de la estructura y la productividad agrícola, la información es limitada y dispersa, su presencia pasa desapercibida debido a los pocos criterios de los sistemas de evaluación de calidad del suelo. Asimismo, estudios demuestran que la aplicación de calcio mejoran significativamente la productividad y reducen los efectos negativos asociados a los excesos de magnesio, estas prácticas resultan económicamente viables y pueden ser una alternativa potencial para mejorar las condiciones sociales y económicas de las comunidades asociadas a la población de suelos magnésicos (Johnston *et al.*, 2016).

Dicho brevemente, es importante investigar el aporte de calcio en suelos magnésicos dedicados a la producción de caña de azúcar, el alcance de esta investigación busca generar información útil para el manejo de estos suelos en el norte del Valle del Cauca, mejorar su productividad, gestionar eficientemente recurso edáfico y económico.

1.Hipótesis

La aplicación de calcio a partir de yeso (sulfato de calcio) o de carbonato mejora las características físicas, químicas y productivas de suelos con exceso de magnesio en el norte del Valle del Cauca.

2. Planteamiento del problema

En el Valle del Cauca colombiano se encuentran los suelos más fértiles del país, no obstante, los problemas más comunes están asociados a desbalances nutricionales y pérdida de la estructura del suelo, que afectan la movilidad del agua y la absorción de nutrientes para las plantas, razón por la cual el desarrollo de los cultivos se ve limitado. Varios investigadores han demostrado la fragilidad de la zona (García, 2002; Madero, 2004; Ramírez, 2011). (O. Garcia, 2002; Madero et al., 2004; Ramírez, 2011)

Madero *et al* (2004) han identificado en estos suelos una alta capacidad de intercambio catiónico debido a que los minerales dominantes en las arcillas son montmorillonitas, ílitas y vermiculitas. Estos autores determinaron que los sitios de intercambio se encuentran dominados por el calcio y magnesio, en menor cantidad por el potasio y sodio, con una alta saturación de bases y la relación Ca:Mg estrecha o invertida ($Mg > Ca$).

Varias clasificaciones definen algunos suelos del Ingenio Risaralda como magnésicos (Darab., 1994; García, 2004; Madero *et al* 2004; Qadir *et al.*, 2018), debido a que de 2438 análisis de suelos que se realizaron entre los periodos de 2020 y 2023, el 53 % reporta propiedades vérticas con saturaciones superiores al 40 % de este nutriente. Otras clasificaciones lo definen como cálcico-magnésico; estimación que se determina asociando la fracción intercambiable que tiene el calcio con respecto al magnesio, por ejemplo, según la relación Ca/Mg los suelos se pueden clasificar en calcio-magnésico (2 a 0.5), magnésico (0.5 a 0.1) e hipermagnésico (>0.1) (Podwojewski, 1995)

Autores Mikkelsen (2010) y Zade (2017) han asociado la disponibilidad de los nutrientes para las plantas en función de la fracción intercambiable y soluble del suelo, además de su relación con los demás cationes y aniones. Estos investigadores señalan interacciones (antagonismos y sinergismos) que pueden causar efectos de degradación sobre las propiedades físicas, como procesos dispersivos sobre las arcillas, oclusión de poros y sellamientos que disminuyen la capacidad de flujo del suelo.

Expertos en el tema (Qadir *et al.*, 2018) afirman que la información actual sobre las implicaciones económicas de los suelos con exceso de magnesio están asociadas básicamente a la productividad de los cultivos. No obstante, estos mismos autores (Qadir *et al.*, 2018) articulan los efectos negativos del exceso de magnesio sobre los costos inscritos a la degradación del suelo, la salud del ambiente, los servicios ecosistémicos, la disminución del valor del mercado de la propiedad agrícola, la reducción del empleo en los sistemas de producción, las consecuentes migraciones, costos sociales derivados de la reducción de operaciones agrícolas y oportunidades de negocio, además de la reducción o pérdida del patrimonio cultural.

Con miras a aumentar la producción de los cultivos sembrados en suelos magnésicos y mitigar el efecto negativo del desbalance de los nutrientes y sus implicaciones sobre las propiedades físicas y químicas del complejo suelo-planta, este estudio pretende identificar el tipo de enmienda más efectivo y sostenible que solucione la problemática desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Estudiar la dinámica del calcio en suelos con alta saturación de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar durante un ciclo de socas, plantillas y en contenedores bajo condiciones controladas en el norte del Valle del Cauca.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el impacto de la aplicación de calcio a partir de sulfato y carbonato sobre la productividad de la variedad CC 05-430 en suelos con alto contenido de magnesio.
- Establecer la fuente y la dosis de calcio más eficiente para la producción de la variedad CC 05-430 en suelos con alto contenido de magnesio.
- Relacionar los cambios físicos asociados a las propiedades hidráulicas y los cambios químicos de la fracción intercambiable y el pH del suelo, generados por la aplicación de calcio a partir de sulfato o carbonato.

4. Justificación

Según el análisis realizado por Asocaña (2023), para el año 2023 la economía agrícola del mundo se enfrentó a un desafiante panorama; durante los últimos tres años el sector ha pasado por fuertes procesos hiperinflacionarios como la pospandemia y la guerra entre Rusia y Ucrania, la cual afectó significativamente el suministro de energía y productos básicos; Ahora bien, Rusia ocupa el primer puesto en el *ranking* de los países exportadores de fertilizantes, el tercero en petróleo, combustibles y cereales; en consecuencia, el costo de producción de los cultivos aumentó a una escala mundial. Según el informe (Asocaña, 2023), el panorama para el sector azucarero en Colombia no es el más alentador, un estallido social que bloqueó el país por casi 8 meses en el 2021 y un fenómeno de la niña que duró casi dos años catalogado como el segundo periodo más lluvioso desde 1995, amenazaron seriamente el desarrollo económico de todo el valle geográfico del río Cauca.

Datos presentados por Cenicaña (2023) en el comité de transferencia de tecnología de la industria, muestran una reducción promedio en las toneladas de azúcar por hectárea de un 9 % respecto al histórico, y un aumento en la edad de corte en un 5.3 %. La gran magnitud del fenómeno de la niña causó daños en predios cosechados en condiciones húmedas y pérdida de oportunidad en las labores agronómicas, especialmente en suelos degradados, sin estructura y mal drenados, causa por la cual se espera que las cañas producidas en el 2022 y cosechadas en el 2023 tengan una productividad inferior al histórico.

La conservación del suelo es fundamental para gestionar el cambio climático y satisfacer las demandas de seguridad y soberanía alimentaria del planeta (FAO, 2015). Alrededor de 1660 millones de hectáreas sufren procesos de degradación asociados a la erosión, pérdida de nutrientes y salinidad, vinculando a esto 927 millones de hectáreas en zonas húmedas, de las cuales el 46 % se encuentran clasificadas como degradación severa y el 53 % como degradación leve; asimismo, en el 2015 cerca de 281 millones de hectáreas se vieron afectadas en toda América del Sur por degradación (FAO, 2021).

En Colombia, 5 millones de hectáreas son utilizadas para la agricultura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2016), de los cuales el 60 % se encuentran bajo riesgo de degradación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [U.D.C.A], 2015), mientras que en el departamento del Valle del Cauca cerca de 117.000 hectáreas se encuentran en riesgo de degradación por sales asociadas al magnesio (García, 2004).

Marín *et al* (2022) caracterizaron en la zona plana del departamento del Valle, 489 sitios de muestreo en 13 cuencas hidrográficas, donde el 44 % correspondía a suelos dedicados a la producción de caña de azúcar. Según el análisis de componentes principales realizado, el 34 % de la variabilidad se explica en función de la compactación, porosidad, densidad, pérdida de la estructura y movilidad del agua en el suelo. Estos investigadores señalan que la problemática se presentó en el 19 % de los puntos muestreados, por otra parte, esta región ostenta excelentes propiedades químicas asociadas al contenido de materia orgánica, CIC y pH.

La zona norte del sector azucarero se concentra aproximadamente en 16.000 hectáreas en 3 departamentos: Caldas, Risaralda y norte del Valle del Cauca. Con miras a explicar la variabilidad e identificar las causas asociadas a la baja productividad de esta zona, el Ingenio Risaralda en el 2023 realizó un análisis multivariado previo al estudio central de esta investigación, mediante un análisis de

componentes principales y agrupamientos jerárquicos de 441 suertes con una productividad inferior a 100 TCH. El estudio concluye que el 37 % de la variabilidad del suelo se asocia al contenido de magnesio y su relación con los demás cationes; por otra parte, el 64 % de las suertes reportan una productividad promedio de 80 TCH, exceso de magnesio y bajos contenidos de calcio.

Los ingenios en el norte del Valle hasta el momento han enfocado el manejo de estos suelos a las labores adecuadas de riego, drenaje y la aplicación de sulfato y carbonato de calcio; los resultados han sido positivos. Si bien en el 2021 la oferta ambiental favorable aumentó la productividad de toda el área en un 17 %, el promedio de suertes a las que se les aplicó enmiendas aumentó en un 30 %; recíprocamente, el fenómeno de la niña del 2022 redujo significativamente el TCH (18 %), no obstante, la productividad en la población de suertes a las que se les aplicó enmienda al inicio de su ciclo se redujo solo en un 4 %.

Las prácticas de manejo indican que la aplicación de calcio tiene un efecto positivo sobre la productividad; sin embargo, no se tiene claridad sobre la dosis ideal ni el tipo de fuente más beneficioso desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. En consecuencia, existe la necesidad de profundizar los estudios del uso de diferentes compuestos y su efecto sobre la nutrición y productividad de la caña de azúcar, además de las propiedades del suelo y su conservación.

5. Marco teórico

La degradación de los suelos por alta saturación de magnesio es una preocupación para la productividad y sostenibilidad del Ingenio Risaralda. Tradicionalmente se ha asociado el contenido de sodio, pH y la mineralogía del suelo a la pérdida de la estructura y dispersión de las arcillas (Rengasamy y Olsson, 1991). No obstante, varias investigaciones han señalado el papel que tiene el potasio y el magnesio en su contribución dispersiva de los agregados (Arienzo *et al.*, 2012; Bennett *et al.*, 2016; Dang *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019).

La estructura del suelo se define como la distribución heterogénea de partículas de distintos tamaños, acompañada de la consecuente formación de espacios vacíos interconectados que posibilitan el movimiento de fluidos como el agua y el aire (Rengasamy, 2018). Esta condición resulta como una de las características más importantes para la conservación del suelo y la productividad de los cultivos; en ese sentido, afecta significativamente el drenaje, la aireación, la retención de humedad, el desarrollo de las raíces y el ciclo de los nutrientes (An *et al.*, 2010; Bernal y Hernández, 2017; Zadorova *et al.*, 2011)

La estabilidad estructural resulta de la capacidad que tiene el suelo para conservar los agregados unidos ante fuerzas externas (Amézketa, 1999). Asimismo, cuando estas superan las fuerzas estructurales del suelo, los agregados se descomponen en tamaños más pequeños; por ejemplo, la labranza reduce significativamente el orden jerárquico de los agregados (Dexter, 1988).

Al humedecerse el sistema, los terrones pueden desintegrarse en microagregados. Este efecto no siempre los destruye ni afecta las condiciones físicas favorables para la producción de los cultivos. Sin embargo, la hinchazón de las arcillas por la interacción del agua con la superficie puede destruir la estructura significativamente; en consecuencia, las propiedades físicas y la productividad de los cultivos se ven comprometidas como se

experimenta en los suelos con alto contenido de sodio, potasio y magnesio (Rengasamy, 2018).

El grado de dispersión de estos elementos aún se encuentra en discusión. Mientras que unos autores resaltan el poder dispersante que tiene el potasio (Dang *et al.*, 2018), otros señalan al exceso de magnesio como un potencial degradador de suelos (Qadir *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019).

Según Rengasamy (2018), se han definido umbrales tradicionales para la degradación de la estructura y la dispersión de arcillas asociados a las sales. El uso de índices como el porcentaje de saturación de sodio y su relación de adsorción (PSI y SAR) ha permitido dar una idea de la calidad del suelo desde el punto de vista estructural; sin embargo, estos índices excluyen los efectos negativos del potasio y el magnesio. Por tal razón, actualmente este autor ha propuesto modelos que consideran el efecto dispersante de estos elementos.

En concreto, las investigaciones en los últimos años han demostrado que el exceso de potasio, magnesio y el sodio está asociado a impactos negativos sobre la estructura, la calidad del agua y la productividad de los cultivos (Arienzo *et al.*, 2012; Marchuk y Rengasamy, 2011; Qadir *et al.*, 2021).

5.1 Efecto de los cationes sobre el suelo

5.1.1 Efecto del calcio en el suelo

García (2009) señala el efecto del calcio sobre la aproximación de las laminillas de arcilla; si aumenta la concentración electrolítica, su doble capa se compacta, esto ocasiona que las partículas colisionen y formen grumos o precipitados. Este fenómeno se conoce como “floculación”; en consecuencia, se forman espacios vacíos de gran tamaño que favorecen el movimiento de fluidos como el agua y el aire del suelo.

5.1.2 Efecto del sodio en el suelo

Debido a que el catión es monovalente, y el espesor de la doble capa difusa en un suelo saturado con sodio puede aumentar significativamente con respecto a los demás cationes, los agregados son menos compactos y sufren altas presiones expansivas que separan las partículas, favoreciendo los procesos de dispersión, oclusión y el taponamiento de poros; consecuentemente todas las propiedades de flujo del suelo se ven afectadas, disminuyendo drásticamente la infiltración y la conductividad hidráulica (Fassbender y Bornemisza, 1987).

5.1.3 Efecto del exceso de magnesio

El exceso de magnesio puede causar problemas similares al sodio sobre las propiedades físicas. Diversos autores han evaluado los efectos negativos de la alta concentración de este catión sobre la productividad y las propiedades de flujo del suelo (Gomez, 1973; Keren, 1991; Quirk & Schofield, 1955). Estudios realizados por García (1986) asociaron procesos dispersivos directos a medida que la saturación de magnesio aumentaba y la relación Ca:Mg disminuía, su exceso puede causar insuficiencias nutricionales en las plantas, ya que inhibe la absorción de otros cationes como el calcio.

5.2 Condiciones asociadas a la baja productividad de la caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca

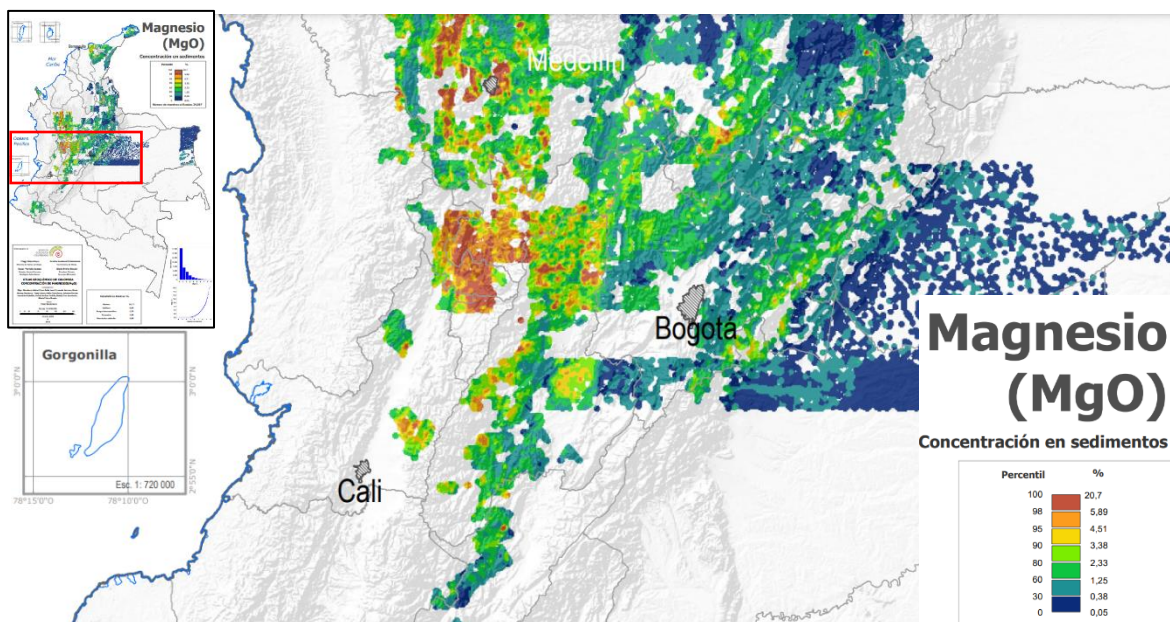
5.2.1 Suelos con alto contenido de magnesio

Se refiere a suelos cuya concentración del catión magnesio es elevada, condición que tiene efectos dispersivos similares al sodio, suelen ser muy plásticos y pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. El término “magnésico” agrupa suelos cuyo único criterio es la alta saturación del ion, independientemente de los factores formadores, el material parental o la fuente. En ese sentido, agrupa formas tóxicas acomplejadas con cloruros y sulfatos. Presenta colores oscuros y texturas arcillosas, que conforman suelos con condiciones que limitan el manejo del agua, conocidos como hidromórficos (García, 2009).

Cerca de 117.000 hectáreas del Valle del Cauca se encuentran afectadas por esta problemática (García *et al.*, 1999) incluyendo el 80 % del área total del Ingenio Risaralda (área con relación Ca:Mg inferior a 2).

El área del Ingenio Risaralda intercepta los departamentos de Caldas, Risaralda y norte del Valle del Cauca. Según el Servicio Geológico Colombiano (2020), esta zona presenta las mayores concentraciones de Mg en todo el territorio. Su contenido en los departamentos de Caldas y Risaralda tiene tendencia alta y homogénea con concentraciones de 8.6 % de MgO, mientras que en el Norte del Valle se distribuye de 7.4 % y 7.7 % de MgO (.Figura 5-1).

Figura 5-1: Distribución geográfica de la concentración de MgO en sedimentos en Colombia.



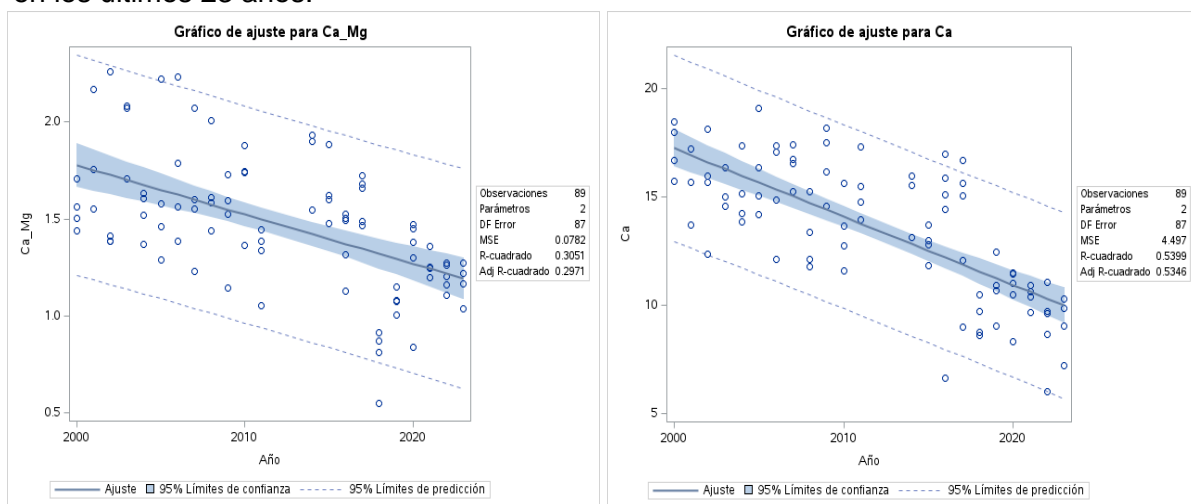
Nota. Adaptado de “Atlas geoquímico de Colombia: magnesio (MgO)”, por Servicio Geológico Colombiano, 2020.

5.2.2 Reducción del calcio y su relación con los cationes

Varias investigaciones realizadas en las últimas décadas han mencionado el incremento de la concentración del magnesio en las aguas de riego y los suelos (Garcia-Ocampo, 2004; Qadir *et al.*, 2014, 2018). En ese sentido, el mantenimiento de los drenajes y los excesivos lavados para reducir la concentración de estas sales son prácticas comunes para la gestión de estos suelos.

En consecuencia, se ha ocasionado la pérdida de otros nutrientes esenciales como el calcio; evaluaciones de la dinámica de la fertilidad en suelos magnésicos de Kazajstán señalan pérdidas del contenido de calcio hasta del 53 % en 70 años (Qadir *et al.*, 2014). Para el caso puntal del Ingenio Risaralda, como se observa en la Figura 5-2, que el contenido promedio de calcio y la relación Ca:Mg de las 4 zonas administrativas se han reducido un 46 % y un 24 % respectivamente en un periodo de 23 años.

Figura 5-2: Reducción del contenido de calcio y la relación Ca:Mg en el Ingenio Risaralda en los últimos 23 años.



Nota. Elaboración propia.

Conocer la concentración que tienen las bases en el complejo de cambio permite hacer inferencias asociadas al tipo de arcilla, la capacidad buffer, pH y el comportamiento de las propiedades físicas del suelo. No obstante, conocer la proporción que tienen los cationes respecto a la capacidad de intercambio catiónico es aún más trascendental para el manejo del cultivo (López, 2016).

En términos generales el balance de los iones debe conservar una relación del 55-65 % de calcio, 20-15 % de magnesio y un 3-5 % de potasio, estos valores cambian según la energía de retención, radio y valencias del ion en el suelo (Castro y Gómez, 2013). Las tablas 5-1 y 5-2 presentan los rangos y relaciones generales en suelos con fines agrícolas.

Tabla 5-1: Relaciones generales para el buen desarrollo agrícola.

Apreciación	Ca ⁺² :Mg ⁺²	Mg ⁺² :K ⁺	K ⁺ :Mg ⁺²	Ca ⁺² :K ⁺	(Ca ⁺² +Mg ⁺²)/K ⁺
Relación Ideal	3-5	6-8	0.2-0.3	12-18	12-20
K deficiente		>10	<0.2	>30	>40
Mg deficiente	>10	<6	>0.3		
Ca deficiente		Relación Ca:Mg invertido			

Nota. Adaptado de “Rangos de niveles edáficos que correlacionan con las exigencias físico-nutricionales de diferentes cultivos comerciales. Fertilidad de suelos y fertilizantes”, por H. Castro y M. Gomez, 2013.

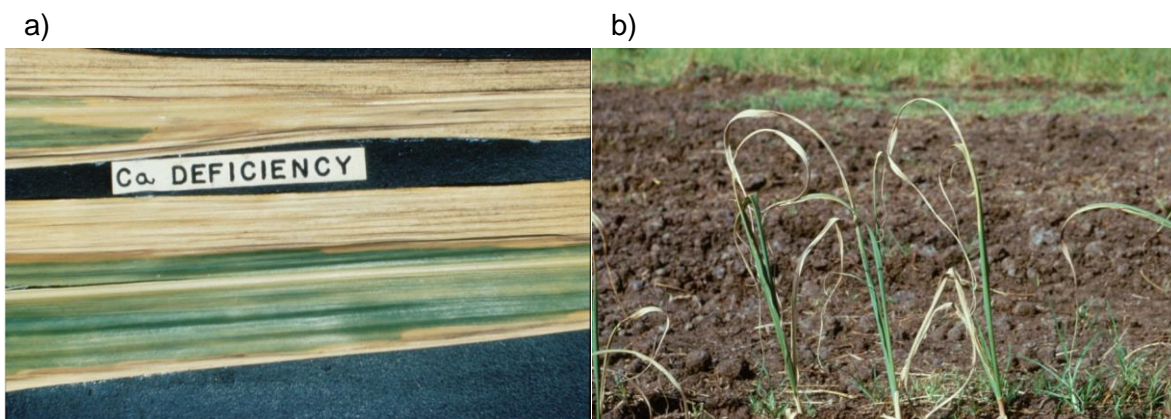
Tabla 5-2: Concentración de bases y saturaciones para el buen desarrollo agrícola.

Apreciación	Ca ⁺²		Mg ⁺²		K ⁺		Na ⁺	
	Cmol.kg ⁻¹	% Sat	Cmol.kg ⁻¹	% Sat	Cmol.kg ⁻¹	% Sat	Cmol.kg ⁻¹	% Sat
Muy Bajo	<2		<0.5		<0.2			
Bajo	2-3	<50	0.5-1.2	<15	0.2-0.4	<2	<0.1	
Medio	>3-6	50-70	>1.2-1.8	15-25	>0.4-0.6	2-3	0.1-0.5	<7
Alto	>6	>70	>1.8	>25	<0.6-1	>3	>0.5	>15

Nota. Tomado de “Rangos de niveles edáficos que correlacionan con las exigencias físico-nutricionales de diferentes cultivos comerciales. Fertilidad de suelos y fertilizantes”, por H. Castro y M. Gomez, 2013.

Las deficiencias del calcio en la caña de azúcar se expresan en forma de moteados y clorosis en las hojas bajas. Asimismo, estas pueden tener un aspecto “oxidado” y morir prematuramente (Figura 5-3, literal a). En plántulas jóvenes la punta de la hoja se necrosa a lo largo de los márgenes (Figura 5-3, literal b).

Figura 5-3: a) Deficiencia de calcio en hojas maduras. b) Deficiencia de calcio en plántulas.



Nota. Tomado de “Diagnóstico nutricional de la caña de azúcar”, por McCray et al, 2006.

5.2.3 Suelos con alto contenido de sodio

Los suelos sódicos presentan características de texturas francas a finas e imponen un techo en la producción, ya que las plantas no logran alcanzar su madurez fisiológica como consecuencia de la restricción que genera sobre la absorción de agua y nutrientes. Tienen un pH muy elevado, baja oxigenación y una insuficiencia en la fertilidad química y biológica, pueden generar serios problemas físicos con la conductividad hidráulica y la infiltración (Pita, 2017).

La degradación de los suelos por sodicidad es cada vez más común en la agricultura, estos efectos tienen graves consecuencias sobre la productividad y el costo del cultivo; de no tratarse podría comprometer seriamente la salud del suelo al punto de la desertificación del territorio (García, 2013). Sin embargo, en el Ingenio Risaralda este tipo de suelos tiene una participación inferior al 3 % de su área.

5.2.4 Suelos sulfatados ácidos

Existen reportes de la presencia de suelos sulfatados ácidos en más de 24 millones de hectáreas afectadas en el mundo (Cabellero *et al.*, 2003) Estos suelos presentan problemas físicos, químicos y biológicos; su extremada acidez, alta saturación de azufre y aluminio afectan el desarrollo de los cultivos. Se caracterizan por presentar una saturación de bases inferior al 50 % y una concentración de aluminio intercambiable cercana a 5 Cmol. kg⁻¹ de suelo. Solo el 1.5 % del área del Ingenio Risaralda reporta suelos con pH inferior a 4 y azufre con más de 150 ppm.

5.3 Estrategias agronómicas para el manejo del suelo en el Norte del Valle del Cauca

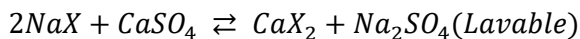
Para que el manejo de suelos con alto magnesio y sodio sea eficiente y eficaz, es necesario tener en cuenta consideraciones previas a la aplicación de cualquier tipo de enmienda mineral u orgánica. De no tenerlas, se puede incurrir en costos económicos sin ningún resultado. El uso de un recurso hídrico de buena calidad y prácticas como la nivelación juega un papel importante para el manejo de este tipo de suelos, con el objetivo de distribuir uniformemente el agua en toda la superficie y evitar encharcamientos que favorezcan la acumulación de sales.

Particularmente en la caña de azúcar se practica el subsolado; consiste en romper los horizontes endurecidos del subsuelo, favoreciendo el movimiento vertical del agua, aumentando la concentración de oxígeno, el desarrollo de la raíz y la producción de macollas. Una vez se haya considerado las recomendaciones anteriores se pueden aplicar enmiendas según el tipo de problema, estas pueden favorecer la floculación de las partículas del suelo, la porosidad, infiltración y demás propiedades hidráulicas.

5.3.1 Uso del yeso

Es el material más usado en la industria para el tratamiento de suelos sódicos y magnésicos. En principio, tiene como objetivo sustituir por iones de calcio los espacios saturados con el sodio y magnesio en el complejo de cambio de las arcillas. Asimismo, realizar lavados y drenajes constantes con el objetivo de controlar la concentración del

cación que esté causando la toxicidad. Un posible ejemplo de la reacción propuesta Fassbender y Bornemisza (1987) lo representa la siguiente ecuación, en ella la X simboliza el complejo de cambio del suelo asociado a los cationes:



Como mencionó García (2009) anteriormente, el aumento en la concentración de la solución de cationes favorece el proceso de floculación y, por ende, las condiciones hidráulicas del suelo. Este autor señala que dicho efecto está condicionado por la velocidad de disolución del mineral, que en el caso del yeso es relativamente lenta, por tal razón, se han recomendado prácticas para su adecuado uso y manejo: factores como la profundidad en la que se incorpore el material, calidad, concentración de la mezcla, tiempo de contacto con el suelo y tamaño de malla son importantes para que desarrolle una acelerada disolución.

5.3.2 Uso del carbonato de calcio

Como ya se mencionó, el yeso es el material más usado para la recuperación de suelos magnésicos, sin embargo, su costo es alto y requiere gran cantidad de agua para su reacción. Además, debe ser oxidado por bacterias y este proceso puede ser muy lento (Aristizábal, 2009)

Se han investigado otros productos sustitutos para el manejo de suelos con exceso de magnesio. El carbonato de calcio es un material ampliamente conocido por su efecto sobre el pH, las propiedades físicas y biológicas (Minato *et al.*, 2023). El encalamiento de suelos ácidos se ha considerado y aceptado como una práctica esencial para la producción agrícola. Sin embargo, en suelos magnésicos no es común su aplicación debido a que es poca la investigación de su uso en condiciones salinas. No obstante, Gutiérrez y González (1965) investigaron sus efectos en el sur del Valle del Cauca, e identificaron que el encalamiento incrementa significativamente la granulación, aireación y drenaje de suelos con problemas asociados a la movilidad del agua.

6. Metodología

La investigación se desarrolló en algunos predios del Ingenio Risaralda, ubicado en los departamentos del Valle del Cauca, Risaralda y Caldas (Colombia) a una altitud entre 850 y 1140 m, con una precipitación anual entre 1083 y 2152 mm y una temperatura promedio entre 23 y 24 °C, correspondiente a la zona de vida bosque seco tropical, con un régimen de precipitación bimodal.

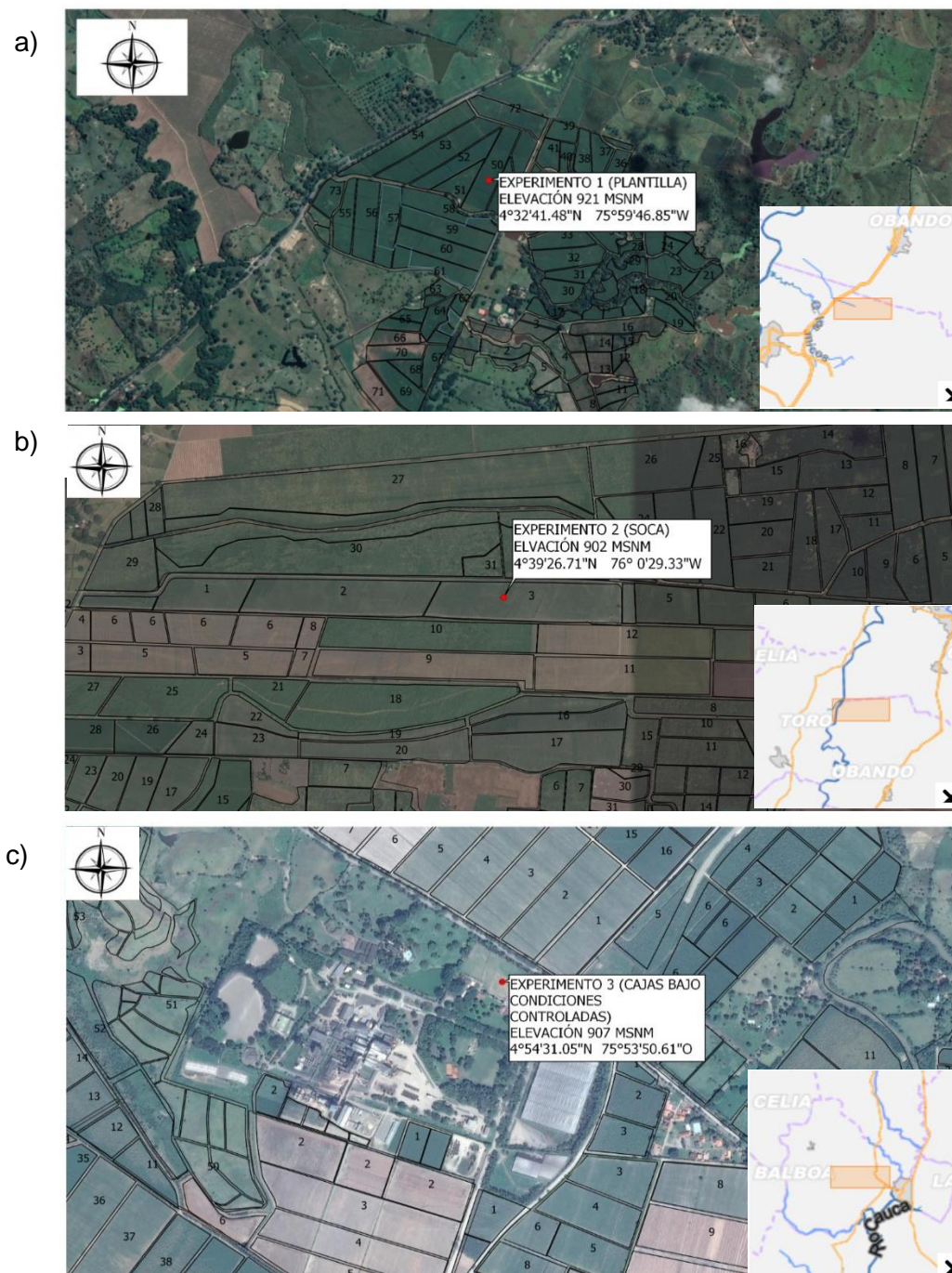
La variedad de caña estudiada correspondió a CC 05-430, material seleccionado para zona semiseca por su alta producción de biomasa. Según Cenicaña (2022) su macollamiento se desarrolla entre los primeros 4 meses después de la siembra, los tallos generados entre el primer y segundo mes aseguran entre el 68 y 78 % de la producción. Es una variedad altamente eficiente en el uso del nitrógeno, en plantillas, fertilizaciones superiores a tres bultos de urea no aseguran un incremento en la producción. Para producir una tonelada de caña el cultivo requiere 0.68 kg de N, 0.11 kg de P y 1.05 kg de potasio. Es un material que responde a altas temperaturas y dosis de madurantes, con una edad de cosecha es entre los 13 y los 14 meses.

6.1 Localidades de estudio

Las localidades de estudio se seleccionaron por sus suelos con alto contenido de magnesio: en la hacienda las Arditas, Balboa y la hacienda La Estrella. En dichas haciendas se ubicaron tres experimentos (Figura 6-1). El primero se estableció en la hacienda las Arditas en una siembra nueva (plantillas), sobre un *Vertic Haplustolls* familia franca fina. En el segundo experimento se realizó en socas después de tres cortes en un *Typic Haplusterts* familia fina en la hacienda La Estrella. El tercer experimento se tomó el mismo suelo del experimento 1 (plantillas) y se sembró la caña en contenedores plásticos,

bajo condiciones controladas en el área de experimentación del ingenio en el municipio de Balboa.

Figura 6-1: Áreas de estudio: a) Experimento 1: Plantillas (hacienda Las Arditas). b) Experimento 2: socas (hacienda Estrella). c) Experimento 3: (Ingenio Risaralda-Virginia).

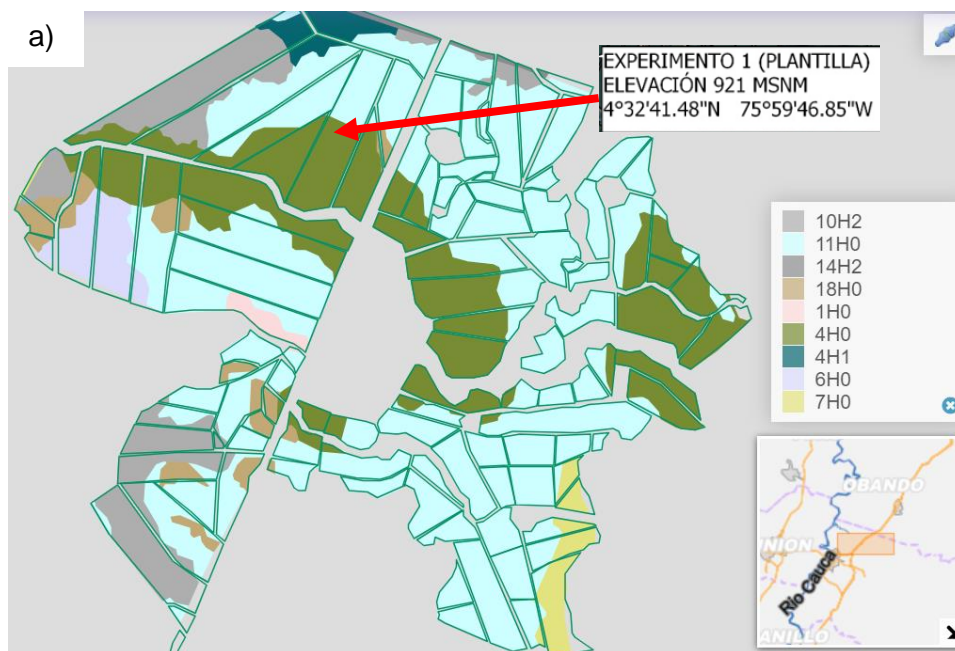


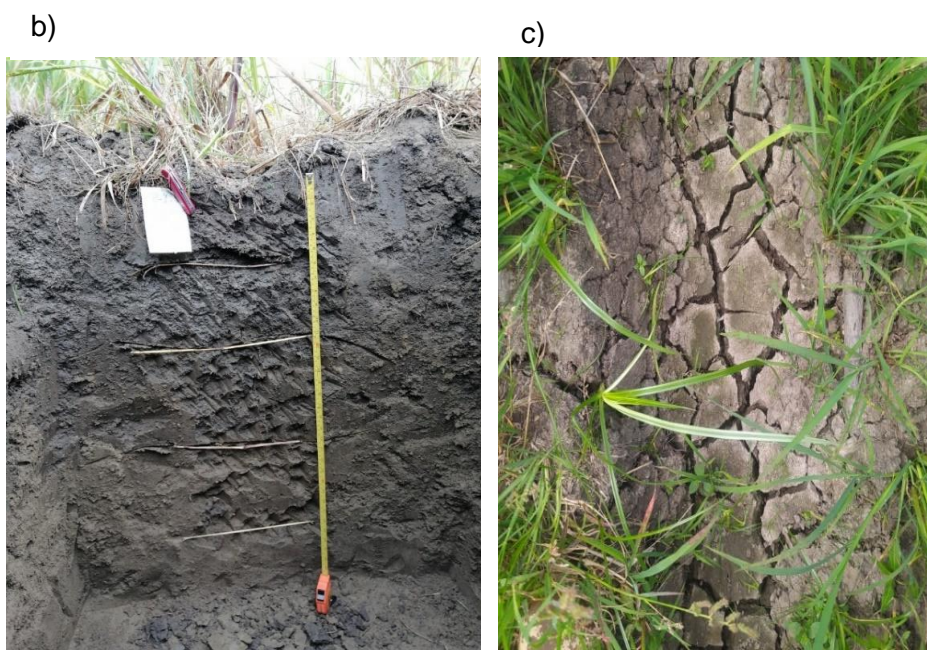
Nota. Tomado de Google Earth (10/11/2023).

6.1.1 Investigación en campo (experimento 1): dinámica del calcio en plantillas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas)

Para este experimento se estableció una siembra nueva o plantillas de la variedad CC 05-430 en la hacienda Las Arditas ($4^{\circ}32'41.48''\text{N}$ $75^{\circ}59'46.85''\text{W}$) en el municipio de Obando. Según el estudio detallado de suelos desarrollado por el Igac y Cenicaña (2006), la figura 6-2 (literal "a") puntualiza la zona agroecológica de esta localidad (11H0 y 4H0), en donde su suelo corresponde a un *Vertic Haplustolls*; estos presentan alta saturación de magnesio y propiedades vérticas que hacen complejo su manejo agronómico, específicamente por variables asociadas a la dificultad en la labranza y la reducida movilidad del agua en el perfil (Figura 6-2, literal "b y c"). Estas características se presentan detalladamente en el anexo A.

Figura 6-2: a) Zonificación agroecológica. b) Perfil Arditas (*Vertic Haplustolls*). c) Agrietamiento.





Nota. a) Adaptado de Cenicaña, 2023 (<https://www.cenicana.org/geoportal/>). b) y c) Elaboración propia.

Según la guía técnica de Cenicaña para la interpretación de análisis de suelos (Quintero, 1993), el contenido de calcio se encuentra en el rango de medio a alto y el de magnesio en alto. A pesar de que el calcio supera los límites de referencia, su absorción se ve limitada debido a la baja relación Ca:Mg. Este suelo se considera moderadamente ácido, con bajo contenido de materia orgánica y alta saturación de bases (Tabla 6-1).

Tabla 6-1: Características químicas del suelo (hacienda Arditas).

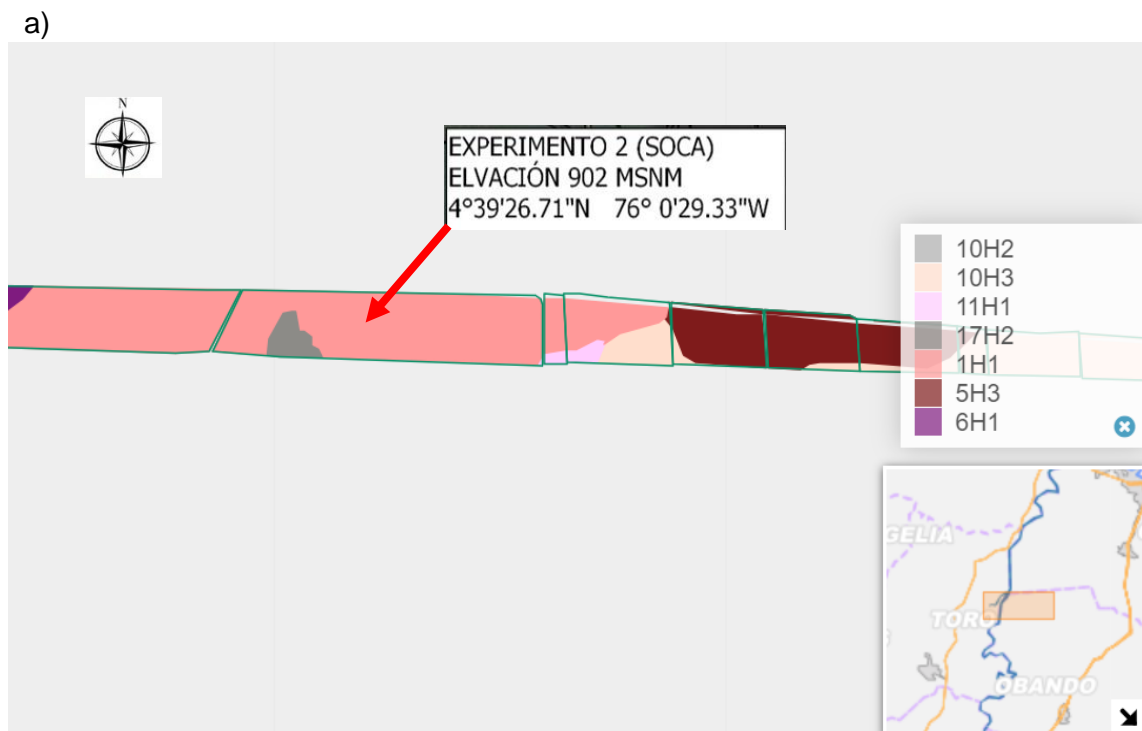
Análisis de suelos						
pH	M.O (%)	CIC	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura
5.73	1.37	19.84	28.98	42.62	28.40	Ar
P (ppm)	S (ppm)	K (meq/100g)	Ca (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Na (meq/100g)	
12.76	11.79	0.56	8.76	10.09	0.43	
Rel Ca/Mg	Rel Ca/K	Rel (Ca+Mg)/K	Sat Ca	Sat Mg	Sat K	
0.87	15.74	33.87	44 %	51 %	3 %	
Fe (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	B (ppm)		
65.18	55.34	2.54	2.46	0.27		

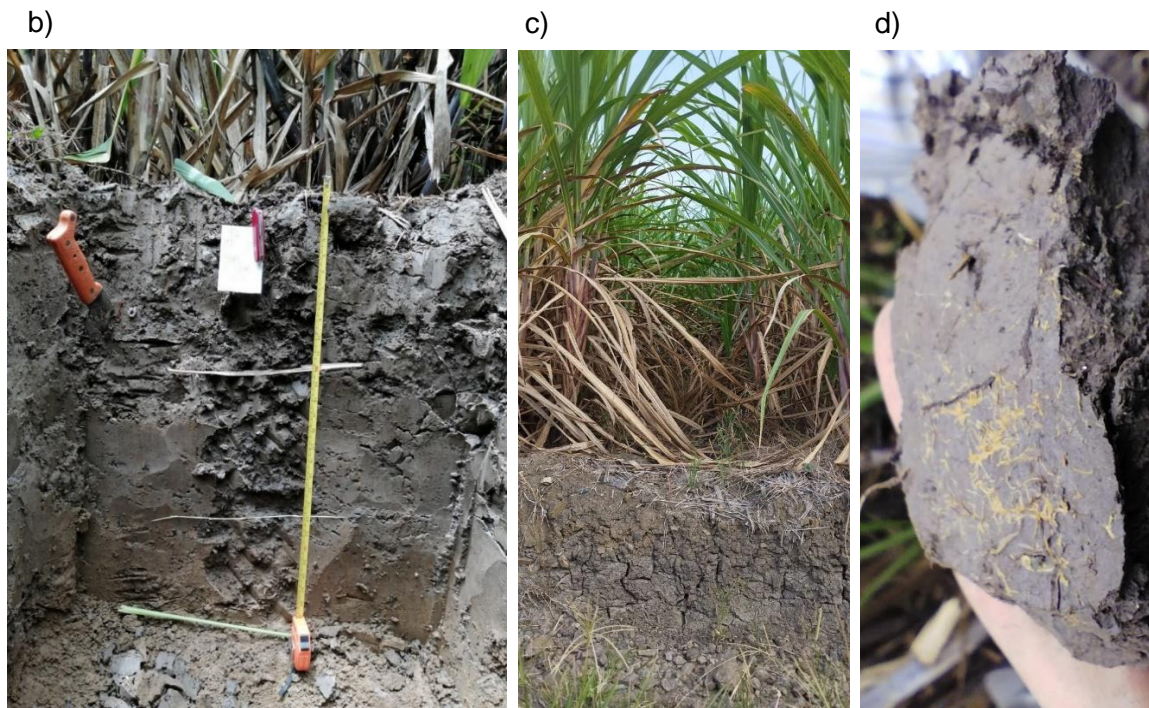
Nota. Elaboración propia.

6.1.2 Investigación en campo (experimento 2): dinámica del calcio en socas de la variedad CC 05-430 (hacienda la Estrella)

Para este experimento se estableció socas de tres cortes de la variedad CC 05-430 en la hacienda la Estrella entre el municipio de Obando y Toro en el norte del Valle del Cauca ($4^{\circ}39'26.71''\text{N}$ $75^{\circ}0'29.33''\text{W}$). Según el estudio detallado de suelos desarrollado por el IGAC y Cenicaña (2006), la figura 6-3, literal “a” puntualiza la zona agroecológica 1H1, en donde sus suelos corresponden a *Typic Haplusterts*. Asimismo, presentan alta saturación de magnesio y propiedades vérticas que hacen complejo su manejo agronómico, específicamente por variables asociadas a la dificultad en la labranza y la reducida movilidad del agua en el perfil. Estas características se pueden visualizar detalladamente en el Anexo B.

Figura 6-3: a) Zonificación agroecológica. b) Perfil la Estrella (*Typic Haplusterts*). c) Agrietamiento. d) Daño mecánico en raíces por la contracción del suelo.





Nota. a) Adaptado de Cenicaña, 2023 (<https://www.cenicana.org/geoportat/>). b), c) y d) Elaboración propia.

Según la guía técnica de Cenicaña para la interpretación de análisis de suelos dedicados a la producción de caña de azúcar (Quintero, 1993), este suelo se considera fuertemente ácido, con buena fertilidad, materia orgánica media y alta saturación de bases. La absorción de calcio se ve limitada debido a la baja relación que tiene con otros cationes como el magnesio y el potasio. La Tabla 6-2 describe los parámetros de textura, contenido de bases intercambiables, pH, materia orgánica, fósforo, azufre y microelementos como el Zn, Fe, Mn, Cu y B.

Tabla 6-2: Características químicas del suelo (hacienda la Estrella).

Análisis de suelos						
pH	M.O (%)	CIC	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura
5.1	2.6	15.6	16.6	61.0	22.4	Ar
P (ppm)	S (ppm)	K (ppm)	Ca (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Na (meq/100g)	
19.1	54.2	0.57	6.43	8.32	0.24	
Rel Ca/Mg	Rel Ca/K	Rel (Ca+Mg)/K	Sat Ca	Sat Mg	Sat K	
0.77	11.30	25.91	41 %	53 %	4 %	
Fe (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	B (ppm)		
53.2	37.7	5.5	3.8	0.23		

Nota. Elaboración propia.

6.1.3 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430

En esta fase de la investigación se estableció el suelo del experimento 1 (*Vertic Haplustolls*) en contenedores plásticos bajo condiciones controladas distribuidas aleatoriamente en el área de experimentación del Ingenio Risaralda, ubicado en el municipio de Balboa, departamento de Risaralda ($4^{\circ}54'31.05''N$ $75^{\circ}53'50.61''O$). La Figura 6-4 muestra la distribución de los contenedores en el campo experimental.

Figura 6-4: Distribución de los contenedores en el área experimental.



Nota. Elaboración propia.

6.2 Diseño experimental

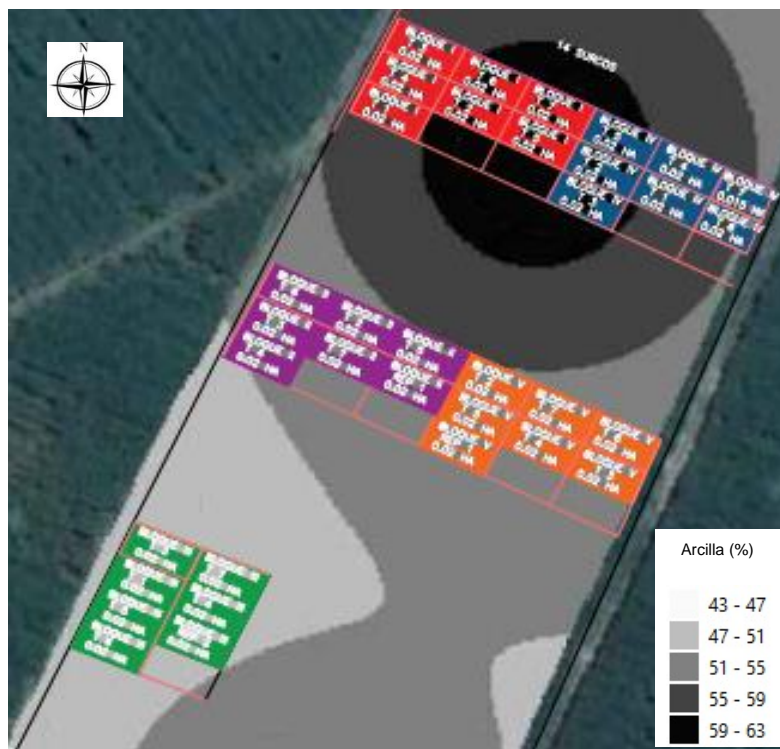
6.2.1 Investigación en campo (experimento 1 y 2): dinámica del calcio en plantillas y socas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas y Estrella)

En estas localidades se tomaron como unidades experimentales parcelas de 200 m², se aplicaron 7 tratamientos con 5 réplicas para un total de 35 unidades experimentales. Los tratamientos correspondieron a aplicaciones de yeso (sulfato de calcio al 95 %, con una concentración del 23 % de Ca) en dosis equivalentes de 1.5 ton.ha⁻¹ (Yeso1); 3 ton.ha⁻¹ (Yeso2); y 4,5 ton.ha⁻¹ (Yeso3); y carbonato de calcio (95 % de pureza, con una concentración del 40 % de Ca) en dosis equivalentes a 1.5 ton.ha⁻¹ (Calcio1); 3 ton.ha⁻¹ (Calcio2); y 4.5 ton.ha⁻¹ (Calcio3).

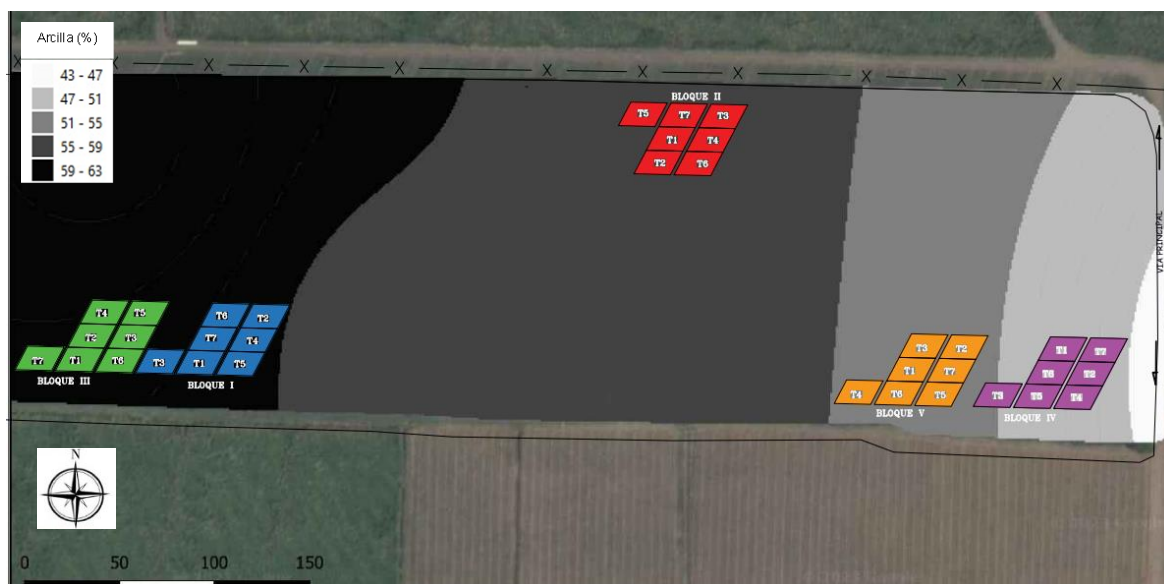
Tanto para las plantillas como para las socas se realizó un diseño experimental en bloques completos al azar. Con el objetivo de identificar zonas homogéneas de suelo para aplicar los tratamientos, se usó como criterio de bloqueo la variabilidad espacial de la arcilla (Figura 6-5). Los resultados se procesaron mediante un análisis descriptivo, ANOVA y prueba de medias utilizando el programa SAS Studio.

Figura 6-5: Distribución de bloques en función de la variabilidad de arcilla. a) Experimento 1 (plantillas). b) Experimento 2 (socas).

a)



b)



Nota. Elaboración propia.

Se evaluó la respuesta de los tratamientos sobre las variables de crecimiento, productividad, contenido de nutrientes en el tejido foliar, propiedades físicas y químicas del suelo (Tabla 6-3). Las variables químicas del suelo y el contenido de nutrientes en el tejido foliar se determinaron según el *Manual de métodos analíticos para el análisis de suelos y tejido foliar en caña de azúcar* (Calero, 1992). Por otra parte, la resistencia a la penetración se midió en campo con la ayuda de un penetrológico CBR de Eijkelkamp, mientras que el resto de las variables físicas se determinaron con el apoyo del grupo de investigación Agroxue de la Universidad Nacional en la sede de Medellín. El rendimiento expresado como contenido de sacarosa se determinó según el *Manual de estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia* (Cenicaña, 1996). Por último, se realizó un análisis económico para identificar la dosis óptima que genere mayor ingreso neto utilizando la siguiente relación (Volke Haller y C. D. P. M., 1982):

$$IN = YPy - (\sum XiPi + CF)$$

Donde:

- IN = ingreso neto
- Y = rendimiento (TAH)
- Py = precio por kg de azúcar (con un precio reportado en diciembre del 2023 de 3,000 COP. kg de azúcar⁻¹)
- $\sum XiPi$ = suma de costos variables
- CF = costo fijo (incluye el costo del predial y la amortización de la adecuación, preparación y siembra “APS” a cinco cortes).

Tabla 6-3: Descripción de los grupos de variables medidas

Grupo	Variabes	Método de cuantificación	Técnica de extracción
Crecimiento y productividad	Altura del tallo ^a	Cinta métrica	--
	Diámetro del tallo ^a	Cinta métrica	--
	Población de tallos molinables ^a	# de tallos por metro lineal	--
	Toneladas de caña por hectárea (TCH) ^a	Corte y alce manual	--
	Toneladas de azúcar por hectárea (TAH) ^a	Relación matemática	--
	Rendimiento (Sacarosa) ^a	Polarímetro	Extracción de jugos por molino experimental

Grupo	Variabes	Método de cuantificación	Técnica de extracción
Contenido de nutrientes en el tejido	Nitrógeno ^b	Espectroscopía de absorción atómica	Digestión ácida (Sulfúrico/Selenio). Destilación Kjeldahl.
	Azufre ^b	Determinación por turbidimetría	Digestión ácida (Clorhídrico)
	Potasio ^b	Espectroscopía de absorción atómica.	Digestión ácida (Sulfúrico/Selenio)
	Calcio ^b	Espectroscopía de absorción atómica.	Digestión ácida (Sulfúrico/Selenio)
	Magnesio ^b	Espectroscopía de absorción atómica.	Digestión ácida (Sulfúrico/Selenio)
	Relación Ca/Mg ^b	Relación matemática	--
Propiedades físicas del suelo	Densidad aparente ^c	Cilindro	--
	Densidad real ^c	Picnómetro	--
	Porosidad ^c	Ollas y platos de presión	--
	Curvas de retención de humedad ^c	Ollas y platos de presión	--
	Sólidos suspendidos ^d	Hidrómetro	--
	Resistencia a la penetración ^c	Penetrologger	--
Propiedades químicas del suelo	Calcio ^b	Espectroscopía de absorción atómica	acetato de amonio, 1N, pH 7
	Magnesio ^b	Espectroscopía de absorción atómica	acetato de amonio, 1N, pH 7
	Potasio ^b	Espectroscopía de absorción atómica	acetato de amonio, 1N, pH 7
	Sodio ^b	Espectroscopía de absorción atómica	acetato de amonio, 1N, pH 7
	Capacidad de intercambio catiónico ^b	Espectroscopía de absorción atómica	acetato de amonio, 1N, pH 7
	Conductividad eléctrica ^b	Potenciometría	extracto de saturación
	pH ^b	Potenciometría	dilución 2:1
	Fósforo ^b	Espectrofotómetro UV/vis	Solución extractora Bray II (HCl + NH ₄ F)
	Azufre ^b	Turbidimetría	fosfato de calcio
Rentabilidad económica	Ingreso neto ^e		

Nota. ^a Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (1996). ^b Calero (1992). ^c Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006). ^d Modificado de González (1990). ^e Volke Haller y C. D. P. M. (1982). Elaboración propia.

6.2.2 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430

En esta localidad se tomaron como unidades experimentales contenedores de plástico de 0.2 m² por 30 cm de profundidad. Se aplicaron 7 tratamientos en el momento de la siembra de la variedad CC 05-430, por 5 repeticiones para un total de 35 unidades experimentales. Los tratamientos correspondieron a aplicaciones de yeso (sulfato de calcio al 95 %, con una concentración del 23 % de Ca) en dosis equivalentes de 1.5 ton.ha⁻¹ (Yeso1); 3 ton.ha⁻¹ (Yeso2); y 4,5 ton.ha⁻¹ (Yeso3); y carbonato de calcio (95 % de pureza, con una concentración del 40 % de Ca) en dosis equivalentes a 1.5 ton.ha⁻¹ (Calcio1); 3 ton.ha⁻¹ (Calcio2); y 4.5 ton.ha⁻¹ (Calcio3).

Se evaluó la respuesta de la aplicación de las enmiendas sobre las variables de crecimiento y acumulación de materia seca, contenido de nutrientes en el tejido foliar, propiedades físicas y químicas del suelo (Tabla 6-4). Adicionalmente, Se realizó un diseño experimental completo al azar y los resultados se procesaron mediante un análisis descriptivo, ANOVA y prueba de medias utilizando el programa SAS Studio.

La Tabla 6-4 describe el grupo de variables químicas del suelo y el contenido de nutrientes en el tejido foliar, cuya determinación se realizó según el manual de *Métodos analíticos para el análisis de suelos y tejido foliar en caña de azúcar* (Calero, 1992). Por otra parte, la resistencia a la penetración se midió en campo con la ayuda de un penetrológico CBR de Eijkelkamp, mientras que el resto de las variables físicas se determinaron con el apoyo del grupo de investigación Agroxue de la Universidad Nacional en la sede de Medellín. Adicionalmente, se determinó la cantidad de sólidos suspendidos de cada tratamiento mediante soluciones con suelo al 10 % seco y tamizado, cada muestra se agitó 20 veces y se tomaron lecturas de densidad con un hidrómetro al tiempo 0; 2; 5; 10; 20; 30; y 120 minutos. Se monitoreó el contenido de humedad del ciclo mediante el sensor de humedad HydroSensell (HS2).

Tabla 6-4: Técnicas y métodos para la determinación de variables.

Grupo de variables	Parámetro	Método	
Crecimiento y acumulación de materia seca	Número de macollas		
	Altura de la yagua		
	Diámetro de la yagua		
	Longitud de la raíz		
	Peso de la hoja		
	Peso de la yagua		
	Peso de la raíz		
	Materia seca total		
Parámetros físicos	Infiltración ^a	Anillos infiltrómetros	
	Resistencia a la penetración ^a	Penetrologger	
	Potencial hídrico y humedad volumétrica ^a	Ollas y platos de presión	
	Sólidos suspendidos ^b	Hidrómetro	
Parámetros químicos	Elemento	Técnica de extracción	Método de cuantificación
	(Ca, Mg, K, Na, ClC) ^c	Acetato de amonio, 1N, pH 7	espectroscopía de absorción atómica
	Conductividad eléctrica ^c	Extracto de saturación	potenciometría
	pH ^c	Dilución 2:1	potenciometría
	P ^c	Solución extractora Bray II (HCl + NH ₄ F)	Espectrofotómetro UV/vis
S ^c	Fosfato de calcio	turbidimetría	
Contenido de nutrientes en el tejido foliar	(Ca, Mg, K, Na, ClC) ^c	Acetato de amonio, 1N, pH 7	espectroscopía de absorción atómica
	P ^c	Solución extractora Bray II (HCl + NH ₄ F)	Espectrofotómetro UV/vis
	S ^c	Fosfato de calcio	turbidimetría

Nota. ^a Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006). ^b Modificado de González (1990).

^c Calero (1992).

6.3 Conducción del experimento

6.3.1 Investigación en campo (experimento 1): dinámica del calcio en plantillas de la variedad CC 05-430 (hacienda las Arditas)

Se realizó un diagnóstico inicial de las propiedades químicas y físicas del suelo, se ajustaron las labores de preparación con la finalidad de acondicionar, aflojar y adecuar para asegurar un rebrote y desarrollo óptimo del tallo de la caña. La labranza primaria se realizó por medio de arado de discos con el fin de retirar el material grande y redistribuir los agregados al suelo, posteriormente los terrones se redujeron por medio de un rastrillo pulidor.

Se corrigieron las irregularidades y desniveles del suelo por medio de una microniveladora, con el objetivo de manejar adecuadamente el flujo de agua de riego y drenaje. Se construyeron los surcos a una distancia de 1.65 m y se construyeron canales para separar las unidades experimentales. La aplicación de los tratamientos se ubicó en el fondo junto con los tallos de la variedad CC 05-430. Después de la tapada se procedió con la aplicación del preemergente y a los dos meses se realizó un control de arvenses.

El manejo de plagas y enfermedades se desarrolló a partir del monitoreo de poblaciones en todas las etapas fenológicas del cultivo. Todas las unidades experimentales tuvieron un promedio de 2.8 % de infestación de *Diatraea tabernella*, a partir de este diagnóstico se definieron los umbrales de daño económico para posteriormente ejecutar un plan de liberación por hectárea: 3 liberaciones de 15 adultos de *Lydella minense*; 1 liberación de 3 g de *Cotesia flavipes*; y 2 liberaciones de 50 pulgadas de *Trichogramma exiguum*. La fertilización se ajustó según los niveles críticos para el cultivo (Muñoz, 2018), se realizó una fertilización granular de forma mecánica y un refuerzo como segunda abonada con solución UAN (fuente nitrogenada). La fertilización acumuló en todo el ciclo 120 kg de nitrógeno, 20 kg de fósforo y 75 kg de potasio.

A los 5.5 meses se muestrearon 25 hojas (con la primera lígula visible) por cada unidad experimental (Figura 6-4, literales “j” y “k”), se tomó el tercio medio y se retiró la nervadura central para después enviar el material al laboratorio de Cenicaña y determinar el contenido de nutrientes en el tejido. Un mes antes de la cosecha se tomaron lecturas de resistencia a la penetración, además de muestras de suelo en cilindros de 5 cm x 5 cm para analizar los parámetros físicos y muestras disturbadas para los parámetros químicos.

Se midieron las variables de crecimiento, se cosechó de forma manual y se pesó cada unidad experimental mediante una estructura desarrollada en el ingenio (Figura 6-6, literal “m” y “l”). Después de la cosecha se enviaron muestras de tallos al laboratorio de calidad para determinar el contenido de sacarosa.

Figura 6-6: Conducción del experimento.



Nota. a) Perfil del suelo. b) Preparación. c) y d) Aplicación de enmiendas. e) Siembra. f) Control de arvenses. h) Fertilización. i) Medición del crecimiento. j) Hoja a muestrear. k) Muestreo foliar. l) y m) Cosecha. n) Muestreo de suelos. ñ) Determinación de la sacarosa. Elaboración propia.

6.3.2 Investigación en campo (experimento 2): dinámica del calcio en socas de la variedad CC 05-430 (hacienda Estrella)

Se seleccionaron socas de tres cortes de la variedad 05-430, se realizó un diagnóstico inicial de las propiedades químicas y físicas del suelo. Se aplicaron los tratamientos 20 días después del tercer corte. El control de arvenses se ejecutó a los dos meses después.

El manejo de plagas y enfermedades se desarrolló a partir del monitoreo de poblaciones en todas las etapas fenológicas del cultivo. Todas las unidades experimentales tuvieron un promedio de 2 % de infestación de *Diatraea tabernella*, a partir de este diagnóstico se definieron los umbrales de daño económico para posteriormente ejecutar un plan de liberación por hectárea: 2 liberaciones de 15 adultos de *Lydella minense*; 1 liberación de 3 g de *Cotesia flavipes*; y 1 liberación de 50 pulgadas de *Trichogramma exiguum*. La fertilización se ajustó según los niveles críticos para el cultivo (Muñoz, 2018). Se realizó una fertilización granular de forma mecánica y un refuerzo como segunda abonada con solución UAN (fuente nitrogenada), la fertilización acumuló en todo el ciclo 175 kg de nitrógeno, 15 kg de fósforo y 75 kg de potasio.

A los 5.5 meses se muestrearon 25 hojas (con la primera lígula visible) por cada unidad experimental, se tomó el tercio medio y se retiró la nervadura central para después enviar el material al laboratorio de Cenicaña y determinar el contenido de nutrientes en el tejido. Un mes antes de la cosecha se tomaron lecturas de resistencia a la penetración, además de muestras de suelo en cilindros de 5 cm x 5 cm para analizar los parámetros físicos y muestras disturbadas para los parámetros químicos.

Se midieron las variables de crecimiento y se cosechó de forma manual y se pesó cada unidad experimental mediante una estructura desarrollada en el ingenio (Figura 6-7, literal "j"), después de la cosecha se procedió a enviar muestras de tallos al laboratorio de calidad para determinar el contenido de sacarosa.

Figura 6-7. Diagrama de flujo de la soca.



Nota. a) Caracterización de las propiedades del suelo. b) Aplicación de los tratamientos. c) Control de arvenses. d) Liberación de benéficos. e) Fertilización. f) Muestreo foliar. g) Medición de crecimiento. h) Medición de la resistencia a la penetración. i) Muestreo de suelos. j) Cosecha. k) Muestras para determinar el contenido de sacarosa.

6.3.3 Investigación bajo condiciones controladas (experimento 3): dinámica del calcio en contenedores de la variedad CC 05-430

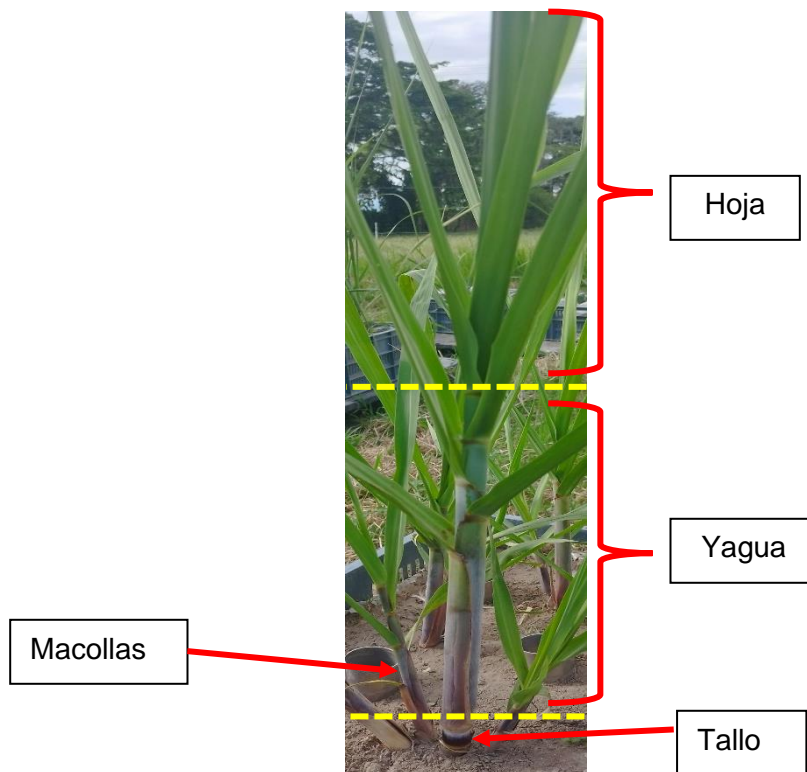
Se extrajo suelo del experimento 1 de la hacienda las Arditas para depositarse en contenedores de 0.2 m² con una profundidad de 30 cm. Antes de ello, se plastificaron las paredes laterales y se adicionó una capa de gravilla en el fondo, el cual estaba perforado con el objetivo de permitir que el agua fluyera libremente a través del perfil. Posteriormente se agregó el suelo en pequeños terrones hasta completar el volumen total de la caja. Se aplicaron los tratamientos y se sembraron 4 nudos de la variedad CC 05-430. Se trasladaron los contenedores y se distribuyeron aleatoriamente en el campo experimental. Posteriormente, se aisló el contacto entre el contenedor y el suelo mediante estibas de plástico completamente lisas.

Se regó el mismo volumen de agua en todas las unidades experimentales en función de la demanda evaporativa, se midió el contenido de humedad y se cuantificó la brotación y el crecimiento en diámetro y altura de la yagua cada semana. Todos los controles de arvenses se realizaron manualmente con una tijera teniendo cuidado de no disturbar la estructura del suelo; seguidamente, se realizaron dos aplicaciones de fertilizante en función del requerimiento de la variedad: la primera aportó el 50 % del nitrógeno, el 100 % del fósforo y el 50 % del potasio; en la segunda se aplicó el restante 50 % del nitrógeno y el potasio.

El contenido de humedad volumétrico se monitoreó periódicamente. Cuando las plantas alcanzaron su máximo crecimiento, se introdujeron tres cilindros de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro en cada contenedor, se midió la infiltración y se tomaron lecturas de resistencia a la penetración en cuatro puntos por medio de un penetrológico. El experimento se cortó a los 154 días después de la siembra, se tomaron 100 g de hojas y se enviaron al laboratorio para determinar el contenido nutricional. Simultáneamente, se recolectaron tres muestras de suelo en cilindros para determinar las constantes de humedad, densidad y porosidad; al mismo tiempo, se recolectó suelo disturbado para determinar las propiedades físicas y químicas.

Por último, se extrajeron las plantas de los contenedores y se midió la longitud de la raíz. Se separaron los órganos en hojas, yaguas, tallos y raíz (los órganos se describen en la Figura 6-8). Se pesaron y se determinó el contenido de materia seca. La Figura 6-9 literal "b" describe gráficamente proceso de la investigación.

Figura 6-8: Descripción gráfica de los órganos medidos.



Nota: Elaboración propia.

Figura 6-9: Resumen del proceso del experimento 3 (contenedores).



Nota. a) Estructura del contenedor. b) Aplicación del suelo y los tratamientos. c) Distribución de los tratamientos en el área experimental. d) Siembra. e) Lecturas de longitud. f) Lecturas de diámetro. g) Fertilización. h) Lectura de la humedad volumétrica. i) Medición de la infiltración. j) Medición de la resistencia a la penetración. k) Muestreo foliar para elementos nutricionales. l) Muestreo del suelo (se visualiza gleisación y poca estructura del testigo en el beaker 1). m) Medición de sólidos suspendidos. n) Corte y recolección de tejidos. ñ) Medición de la raíz. Elaboración propia.

7.Resultados y discusión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de varianza y la prueba de comparación de medias. El análisis de varianza permitió identificar si existen diferencias significativas entre los tratamientos; por su parte, la prueba de comparación de medias determinó los tratamientos de mayor impacto para la investigación.

7.1 Experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas)

7.1.1 Grupo de variables asociados al crecimiento y a la productividad

Se presentaron diferencias altamente significativas para la variable longitud del tallo. Los mayores valores se alcanzaron en los tratamientos con aplicaciones de carbonato de calcio y disminuyeron en la medida en que se incrementó su dosis; por otra parte, la aplicación de yeso no tuvo efecto significativo respecto al testigo a excepción del Yeso 2 (3 ton yeso.ha⁻¹).

La longitud del cogollo no presentó diferencias significativas, con un máximo de 29 cm y un mínimo de 25 cm. Asimismo, el diámetro del tallo tampoco, con un máximo de 28 cm y un mínimo de 26 cm. Este resultado se puede atribuir a la estabilidad de las variables en CC 05-430.

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos para la población de tallos por metro lineal. El mayor valor se encontró con la aplicación de carbonato de calcio, y disminuyó conforme se aumentó la dosis hasta en un 42 %. En el caso del yeso no se presentaron diferencias significativas con respecto al testigo, a excepción del Yeso 2 (3 ton yeso por ha), el cual incrementó la población de tallos por metro lineal en un 36 %.

Se detectaron diferencias significativas para las toneladas de caña por hectárea (TCH). La mayor productividad se evidenció en la menor dosis de carbonato de calcio (Calcio1), que disminuyó conforme aumentó la dosis hasta en un 47 % en promedio. La aplicación de yeso no presentó diferencias significativas con respecto al testigo, esta tendencia coincide con investigaciones desarrolladas por Carvalho *et al* (2013), las cuales no encontraron un aumento significativo en la productividad de la caña de azúcar con la aplicación de este material.

Otros investigadores como Morelli *et al* (1992) han encontrado efectos positivos en el crecimiento de los tallos tanto para la aplicación de carbonato como de yeso, sin detectar diferencias significativas entre estos tratamientos. Incluso, investigadores como Crusciol *et al* (2017) han reportado un incremento de la productividad de la caña con la mezcla de los dos materiales en contraste con la aplicación de carbonato o yeso por sí solos.

El rendimiento en la acumulación de sacarosa presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Según la prueba de comparación de medias, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos a excepción de la dosis mínima de carbonato respecto a la dosis máxima de yeso con 10.8 y 10.08 %, respectivamente.

Se evidenciaron diferencias significativas para las toneladas de azúcar por hectárea (TAH). Al realizar la prueba de comparación de medias, la menor dosis de carbonato (Calcio1) logró incrementar en promedio un 73 % el TAH respecto al testigo.

En síntesis, la menor dosis de carbonato (Calcio1) se destacó significativamente en crecimiento y productividad (Tabla 7-1). Los resultados muestran una respuesta positiva sobre la longitud del tallo, diámetro, población, TCH, rendimiento y TAH. Sin embargo, el crecimiento y la productividad se redujo al incrementar las dosis de carbonato de calcio.

Tabla 7-1: Comparación de medias de las variables asociadas al crecimiento y a productividad (TCH: toneladas de caña por ha; TAH: toneladas de azúcar por ha).

Tratamiento	Longitud del tallo (cm)	Longitud del cogollo (cm)	Diámetro (mm)	Población de tallos (m)	TCH	Rendimiento sacarosa (%)	TAH
Calcio1	186.17 a	26.67 a	27.17 ab	11.62 a	116.1 a	10.82 a	12.5 a
Calcio2	178.25 a	27.63 a	27.75 a	9.72 ab	109.24 ab	10.64 ab	11.64 a
Calcio3	156.97 b	27.10 a	25.92 b	6.70 c	61.42 c	10.57 ab	6.50 b
Testigo	157.49 b	26.21 a	26.25 ab	6.68 c	69.04 c	10.45 ab	7.19 b
Yeso1	153.08 b	25.36 a	26.89 ab	5.39 c	66.01 c	10.63 ab	7.03 b
Yeso2	181.46 a	29.09 a	27.77 a	9.12 b	82.88 bc	10.61 ab	8.76 b
Yeso3	154.65 b	26.63 a	27.32 ab	6.42 c	62.48 c	10.08 b	6.34 b

Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

Se evidenció como la dosis más baja de carbonato de calcio alcanzó la mayor productividad, superando aun así el tratamiento convencional para el manejo de este tipo de suelos como lo es el sulfato de calcio. En ese orden de ideas, otros estudios han demostrado la poca respuesta que tiene la aplicación del azufre sobre el rendimiento en suelos arcillosos (Ye *et al.*, 2011). En contraste, la dosis mínima de carbonato logró incrementar un 3 % la sacarosa, si bien no se detectaron diferencias significativas respecto al testigo, a nivel comercial, este valor es altamente significativo para el negocio de la caña.

7.1.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar

El contenido de nitrógeno foliar no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, con un máximo de 1.23 % y un mínimo de 1.13 %. El contenido de fósforo evidenció diferencias significativas entre los tratamientos con un máximo 0.11 % en la dosis media de carbonato (Calcio²), su contenido disminuyó significativamente en las dosis máximas de carbonato y yeso a valores de 0.07 % y 0.05 % respectivamente.

Este comportamiento se puede atribuir a probables procesos de fijación como consecuencia de las altas dosis de calcio (Fassbender y Bornemisza, 1987), adicionalmente, está reportada la capacidad que tiene el carbonato de calcio para precipitar iones en la solución del suelo (Wei *et al.*, 2006). Sin embargo, ninguno de los tratamientos alcanzó la concentración ideal propuesta por Cenicaña (2022) para esa variedad (0.19 %).

El contenido de azufre en el tejido foliar se incrementó de forma significativa correspondiendo con el incremento de las dosis aplicadas de yeso. Estudios como los realizados por Wiedenfeld (2011), han demostrado la respuesta de la aplicación de sulfatos sobre la disponibilidad del nutriente en la caña de azúcar, no obstante, dosis altas de este elemento puede impactar negativamente sobre el crecimiento y la productividad de este cultivo. En este sentido, el alto contenido de azufre en el tejido no incrementó significativamente la productividad de la plantilla de CC 05-430.

La acumulación de potasio no fue afectada por los tratamientos aplicados. Adicionalmente, ninguno de los tratamientos alcanzó la concentración óptima para la variedad (1.7 %) reportada por Cenicaña (2022).

En contraste con los reportes desarrollados en la caña de azúcar por Donaldson *et al* (1990), quienes afirman una reducción en la absorción del potasio como consecuencia de la alta concentración de calcio en el suelo, no concuerdan con los resultados obtenidos en el experimento 1 (plantillas); los cuales coinciden con investigaciones desarrolladas por Rhodes *et al* (2018) en este cultivo, donde indican que rara vez se genera la supresión de la absorción de potasio como consecuencia de la aplicación de calcio.

El contenido de calcio en el tejido foliar presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Asimismo, la prueba de comparación de medias señala incrementos en la concentración del nutriente para las dosis más bajas de carbonato y yeso (0.25 % para los dos tratamientos), alcanzando el nivel óptimo (0.25 %) para variedad 05-430 reportado por Cenicaña (2022).

No obstante, la concentración de calcio decrece a medida que se aumenta el nivel de calcio aportado, marcando diferencias significativas entre las dosis máximas y el testigo. Estudios desarrollados por McCray y Ji (2018) obtuvieron resultados similares con la aplicación de carbonatos y silicatos de calcio, los cuales redujeron su concentración en el tejido foliar con las dosis máximas (6.7 ton.ha⁻¹).

El contenido de magnesio no presentó diferencias significativas con la aplicación de carbonato de calcio. En contraste, al aplicar yeso y al incrementar su concentración disminuye significativamente la concentración de magnesio acumulado en el tejido foliar. Este comportamiento coincide con investigaciones desarrolladas por McCray y Ji (2018), donde señala que estas cales no afectan la concentración del magnesio en el tejido foliar de la caña de azúcar. Por otra parte, ninguno de los tratamientos alcanzó el nivel óptimo (0.14 %) para la variedad CC 05-430.

Los tratamientos las dosis mínimas de yeso y carbonato (Yeso1 y Calcio1) incrementaron la relación Ca:Mg en un 30 y 23 % respectivamente, presentando diferencias significativas respecto al testigo. Por otra parte, la dosis máxima de carbonato redujo significativamente la relación Ca:Mg. sin embargo, todos los tratamientos alcanzaron el nivel óptimo para esta relación (1.78) a excepción del testigo y el Calcio3. La tabla 7-2 resume el contenido de nutrientes en el tejido foliar.

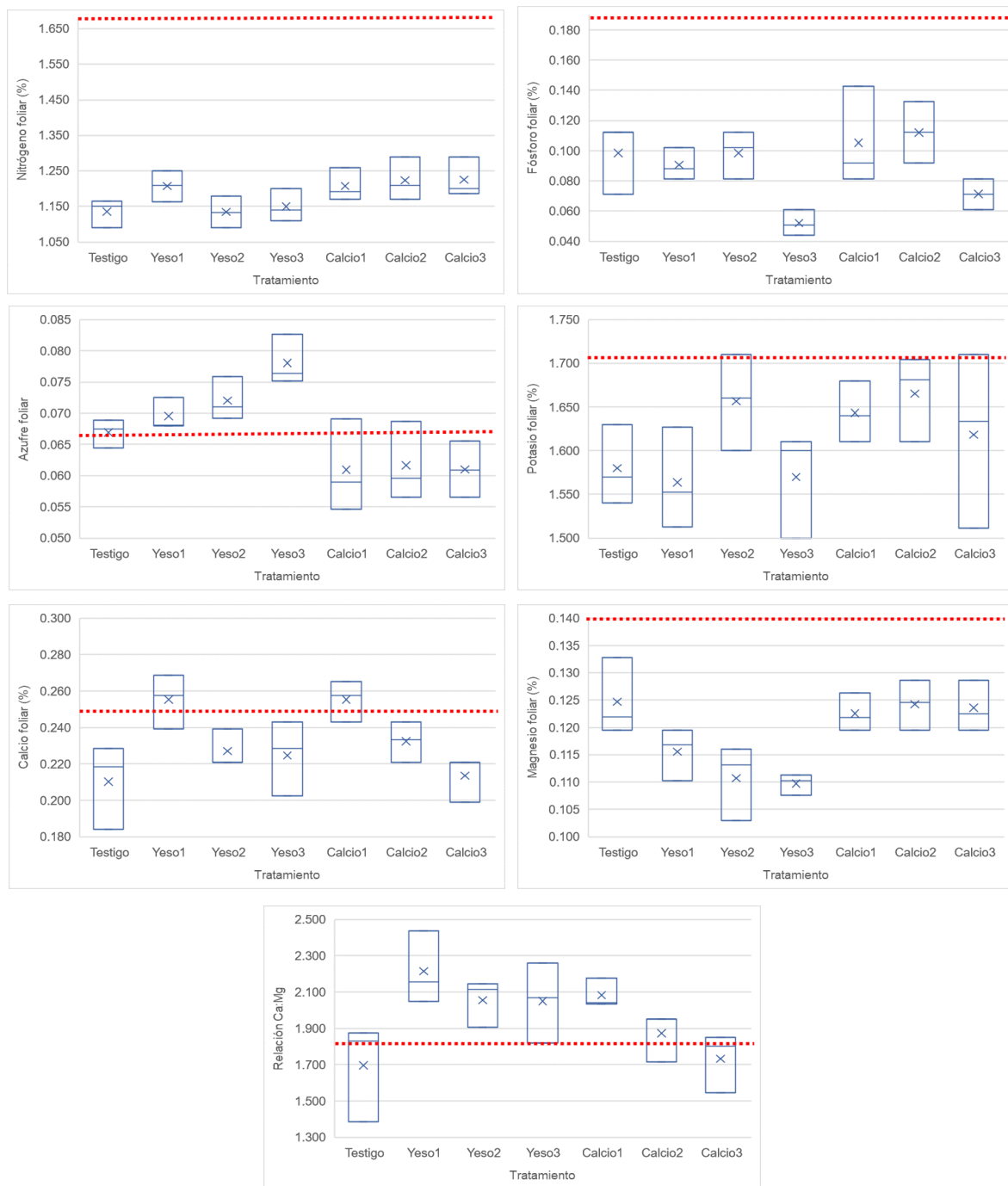
Tabla 7-2: Concentración de nutrientes en el tejido foliar en la plantilla.

Concentración en el tejido foliar (%)							
Tratamiento	N	P	S	K	Ca	Mg	Ca/Mg
Calcio1	1.21 a	0.10 ab	0.06 c	1.64 a	0.25 a	0.12 a	2.08 ab
Calcio2	1.22 a	0.11 a	0.06 c	1.66 a	0.23 ab	0.12 a	1.87 bc
Calcio3	1.23 a	0.07 bc	0.06 c	1.61 a	0.21 b	0.12 a	1.73 c
Testigo	1.14 a	0.10 ab	0.07 bc	1.58 a	0.21 b	0.12 a	1.69 c
Yeso1	1.21 a	0.09 ab	0.07 abc	1.56 a	0.25 a	0.11 ab	2.21 a
Yeso2	1.13 a	0.10 ab	0.07 ab	1.65 a	0.22 ab	0.11 b	2.05 ab
Yeso3	1.15 a	0.05 c	0.08 a	1.57 a	0.22 b	0.10 b	2.04 ab

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

La Figura 7-1 describe gráficamente la distribución de los nutrientes por tratamiento y su comparación con el nivel óptimo de referencia reportado por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430.

Figura 7-1: Distribución de los nutrientes en el tejido por tratamiento de la plantilla y su relación con el nivel óptimo reportado por Cenicaña (2022).



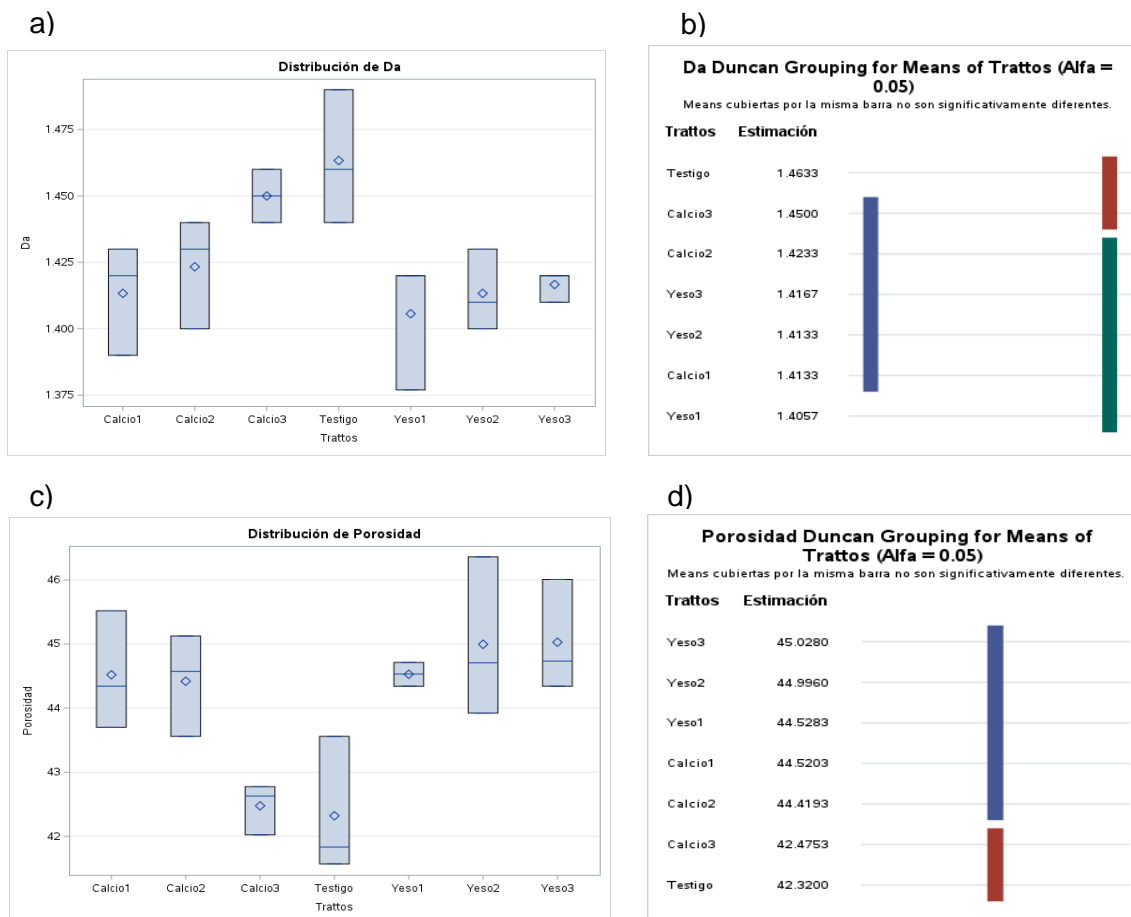
Nota: La línea punteada roja representa el nivel óptimo de referencia para la variedad. Elaboración propia.

7.1.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo

- Densidad aparente

La aplicación de yeso redujo significativamente la densidad e incremento la porosidad conforme aumentaba su dosis, la cual evidenció diferencias significativas respecto al testigo (Figura 7-2). En ese sentido, Aristizábal (2009) también reporta un incremento de la macroporosidad con forme aumentaba la concentración de sulfato de calcio en comparación con el sulfato de magnesio en suelos del valle del Cauca.

Figura 7-2. a) Distribución de la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).



Nota: Elaboración propia.

- Infiltración

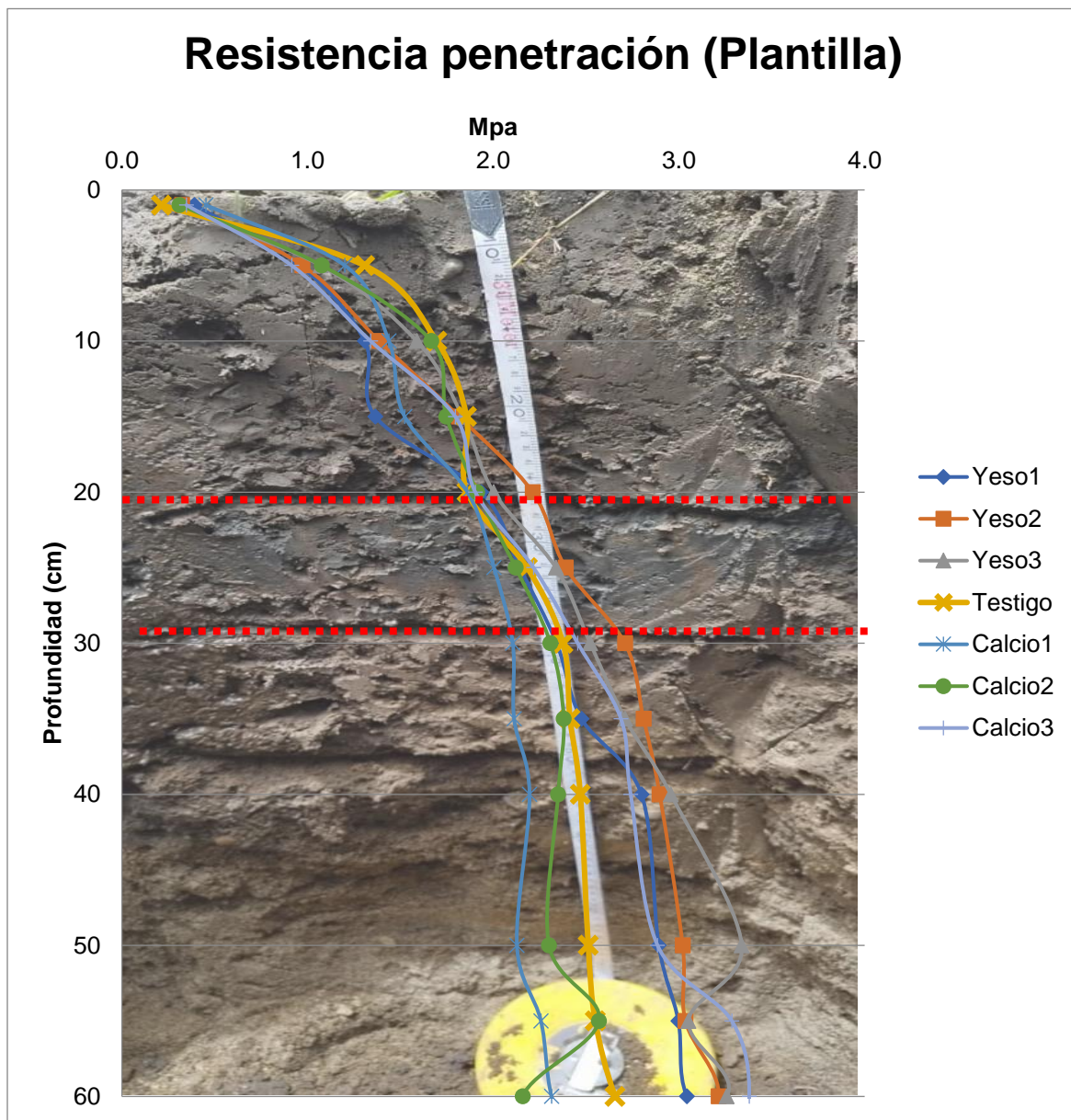
Ninguno de los tratamientos logró infiltrar el suelo. Si bien el incremento de la concentración de calcio en la solución aportada por las enmiendas aumenta significativamente la estabilidad de los agregados y la conductividad hidráulica (Ali, 2018; Dang, 2018; Zhu, 2019), otros iones como el sodio y el magnesio la reducen (Jayawardane, 2011; Qadir *et al.*, 2018). En ese sentido, el efecto dispersante del exceso de magnesio en la saturación del suelo pudo ser significativamente mayor al efecto floculante de las enmiendas. Asimismo, la relación entre iones dispersores y floculantes pueden modificar fuertemente las propiedades hidráulicas del suelo (Rengasamy.y Marchuk, 2011).

- Resistencia a la penetración

Con respecto a la resistencia a la penetración, en el experimento 1 (plantillas) todos los tratamientos tuvieron un aumento de la resistencia a la penetración a una profundidad de 20 cm como consecuencia de un horizonte endurecido, por tal razón no se pueden apreciar diferencias concluyentes entre tratamientos (Figura 7-3)

Figura 7-3: Resistencia a la penetración en plantillas.

a)

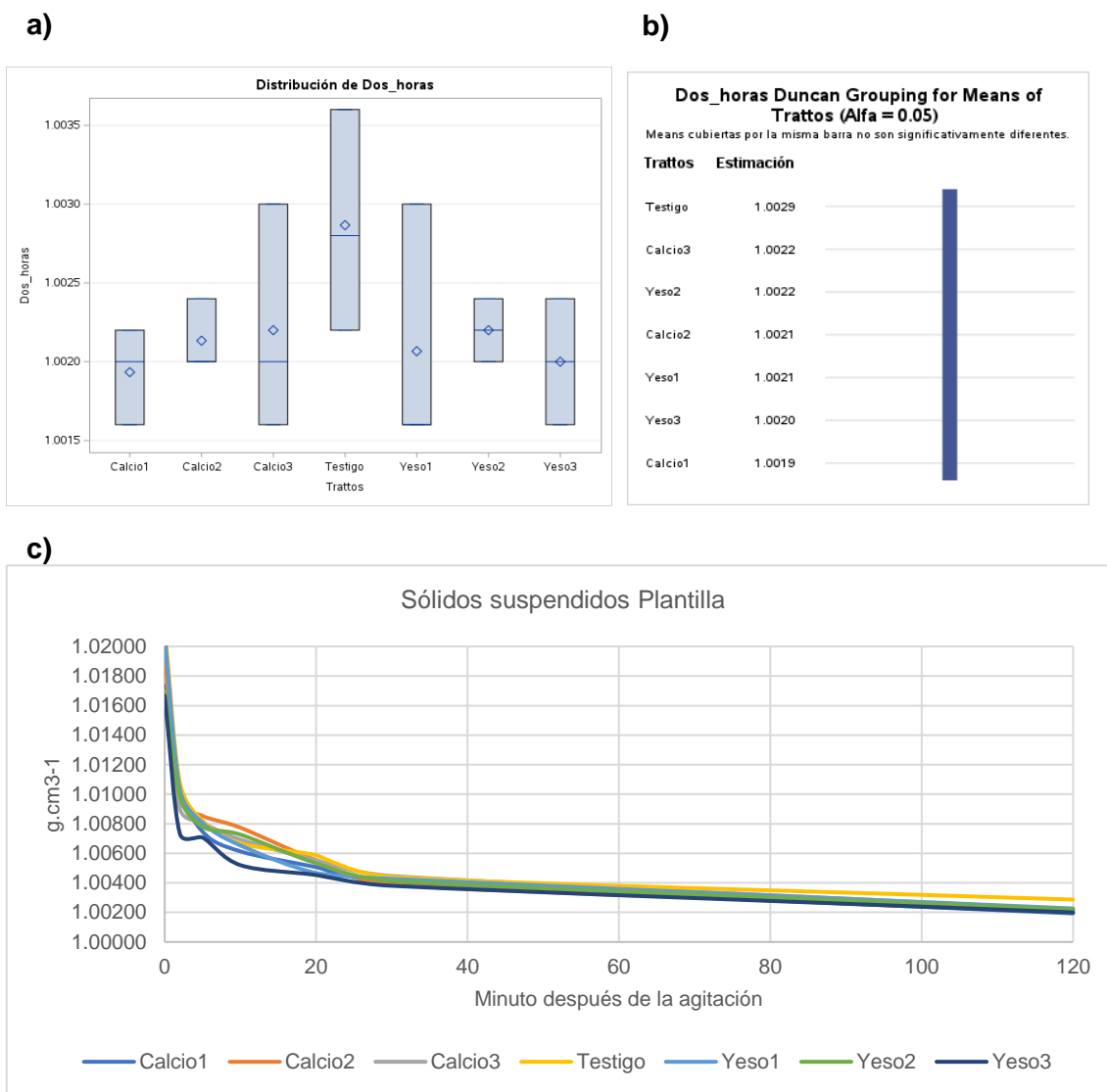


Nota: La línea roja punteada señala el inicio de la zona con mayor impedancia mecánica.
Elaboración propia.

- Sólidos suspendidos en la solución

Según el análisis de varianza ninguno de los tratamientos presentó diferencias significativas, sin embargo, el testigo reportó los valores de sólidos suspendidos más altos (Figura 7-4). Ahora bien, investigaciones desarrolladas por Aristizábal (2009) relaciona el radio de hidratación del calcio y el magnesio asociado a la transmitancia y el coeficiente de dispersión de arcillas de suelos del valle del Cauca, en ese sentido, demuestra que el mayor radio de hidratación del magnesio produce una hinchazón sobre las arcillas que conlleva a la ruptura de los agregados, aumento de la arcilla dispersa, reducción en la transmitancia y la degradación de la estructura.

Figura 7-4: Sólidos suspendidos: a) Distribución de la densidad de la solución ($\text{g}\cdot\text{cm}^3\cdot^{-1}$). b) Prueba de medias. c) Precipitación de los sólidos en función al tiempo.

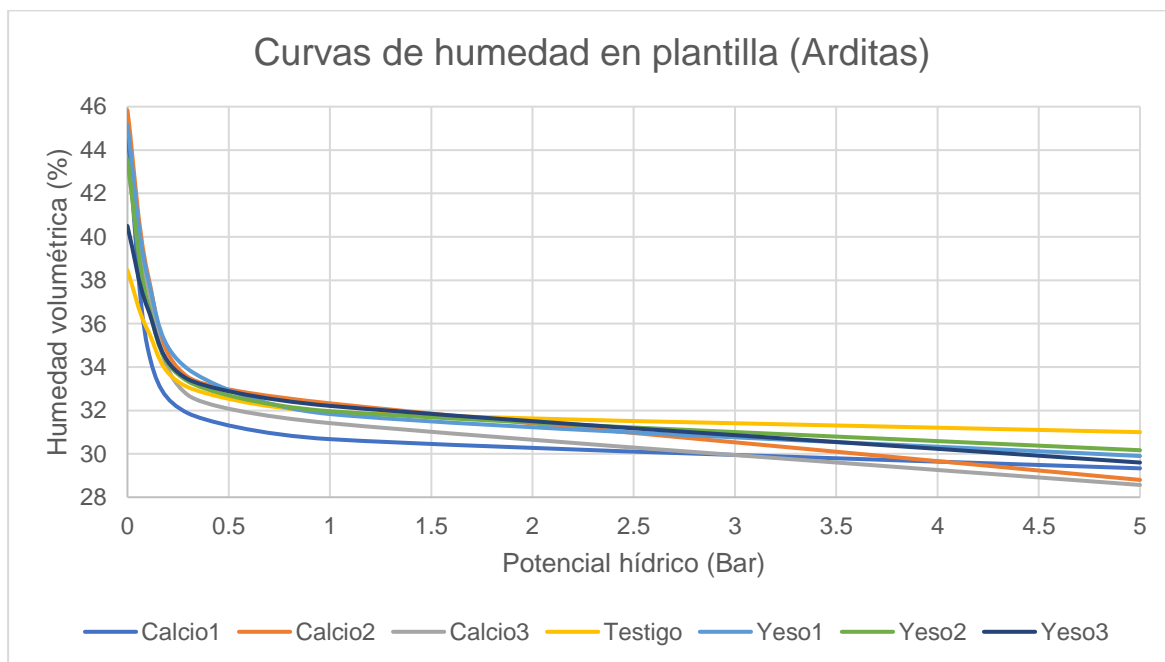


Nota: Elaboración propia.

- Potencial hídrico y humedad volumétrica

En la Figura 7-5 se observan las variaciones asociadas a la humedad volumétrica en todos los puntos de tensión. Al aumentar la concentración electrolítica con los tratamientos se incrementó la capacidad de retención en puntos de baja tensión (saturación), en ese sentido, el calcio aportado logró incrementar la floculación y agregación del suelo. Por otra parte, el testigo presentó pérdidas del tamaño de los agregados e incrementó la microporosidad y la humedad volumétrica en zonas de alta tensión (> 3 Bar). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Aristizábal (2009), los cuales demostraron el potencial superior del magnesio sobre el calcio en la capacidad de incrementar la humedad volumétrica en zonas de alta tensión de humedad.

Figura 7-5: Curvas de retención de humedad plantilla.



Nota: Elaboración propia.

1.1.4 Propiedades químicas del suelo

La aplicación de carbonato de calcio incrementó de significativamente el pH respecto a los demás tratamientos, este valor aumentó conforme lo hicieron las dosis. El efecto también lo reportaron Crusciol *et al* (2017), Rodrigues *et al* (2021) y Pang *et al* (2019) en suelos dedicados a la producción de azúcar donde se aplicó carbonato. Asimismo, el pH se redujo significativamente conforme incrementaban las dosis de yeso. De la misma forma, autores como Turan *et al* (2013) han asociado un incremento de la acidez a la aplicación de yeso.

Las dosis máximas de carbonato de calcio incrementaron significativamente la conductividad eléctrica del suelo. En tal sentido, está soportado que estas dos variables tienen una correlación directa y significativa (Solís-Castro *et al.*, 2018). Ahora bien, la conductividad eléctrica incrementó con la dosis más alta de yeso, la cual presentó una diferencia significativa respecto al testigo. De la misma forma, este crecimiento de la variable se puede asociar a los altos aportes de sulfatos, experiencias con la aplicación de azufre en el cultivo de la caña de azúcar desarrolladas por Wiedenfied (2011), lograron identificar que los niveles de salinidad en el suelo entre los 0 y 15 cm de profundidad incrementaron linealmente conforme aumentaba la dosis de azufre hasta alcanzar niveles perjudiciales para el cultivo.

Las dosis máximas de carbonato de calcio y yeso redujeron significativamente el contenido de fósforo en el suelo, del mismo modo que ocurrió en el contenido foliar. Asimismo, Fan *et al* (2022) coinciden que la aplicación de enmiendas a base de calcio puede inducir la formación de fósforo estable en el suelo, causando una reducción en la solubilidad y consecuente disminución de su disponibilidad para los cultivos.

La aplicación de dosis máximas de yeso incrementó los contenidos de azufre en el suelo, en donde se presentaron diferencias altamente significativas con respecto al testigo. Del mismo modo, Araujo *et al* (2018) coinciden que la aplicación de yeso, incrementa significativamente los niveles de azufre en suelos dedicados a la producción de caña de azúcar.

Ninguno de los tratamientos logró incrementar significativamente los niveles de potasio en el suelo. Para tal efecto, investigaciones desarrolladas por Pang *et al* (2019), señalan que la aplicación de enmiendas cálcicas no tiene un efecto significativo sobre el contenido de

potasio en el suelo, en contraste, si lograron detectar incrementos en los niveles de calcio y magnesio.

El carbonato incrementó significativamente el contenido de calcio en el suelo conforme aumentaba la dosis hasta un 49 %. Por otra parte, el yeso logró aumentar los niveles de calcio a una tasa menor (25 %). De manera similar, Vyshpolsky *et al* (2008) estudiaron la respuesta de la aplicación de enmiendas cálcicas en suelos con altas saturaciones de magnesio, para tal efecto, consiguieron demostrar que el uso de estos materiales aumentó la concentración de calcio en el suelo y provocó la reposición del exceso de magnesio.

De este modo, la aplicación de yeso y carbonato logró reducir hasta un 32 % y un 6 % el contenido de magnesio en el suelo respectivamente, sin embargo, solo las dosis de yeso lograron presentar diferencias significativas respecto al testigo. Retomando los estudios de Vyshpolsky *et al* (2008), la aplicación de enmiendas redujo hasta un 31 % el porcentaje de magnesio intercambiable (PMI), en ese sentido, la relación Ca:Mg tuvo un incremento altamente significativo respecto al testigo.

En visto a que el contenido de calcio incrementó y se redujo la concentración de magnesio, todos los tratamientos aumentaron significativamente la relación Ca:Mg conforme crecía la dosis. No obstante, el único tratamiento que alcanzó el nivel ideal para la caña de azúcar (2) reportado en la guía de Cenicaña (Quintero, 1993), fue el Yeso3 con un valor de 2.13.

Todos los tratamientos disminuyeron el contenido de sodio, sin embargo, solo las dosis de yeso presentaron diferencias significativas respecto al testigo. En este sentido, reportes por Gonçalo Filho *et al* (2019) destacan la capacidad que tiene este material para reducir la concentración de sodio en el suelo, al mismo tiempo, afirman que este efecto se explica por la sustitución del calcio por el sodio en el complejo de cambio. La tabla 7-3 resume los resultados de las propiedades químicas del suelo.

Tabla 7-3: Propiedades químicas del suelo de la plantilla.

Tratamiento	CE	pH	P	S	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ca:Mg
	mS.cm ⁻¹		ppm			meq.100g ⁻¹				
Calcio1	0.92 ab	7.00 a	29.7 a	10.3 bc	0.98 a	13.6 ab	8.6 ab	0.05 ab	17.6 abc	1.62 b
Calcio2	0.97 a	7.08 a	31.2 a	13.8 abc	1.02 a	14.1 ab	8.3 ab	0.06 a	16.2 bc	1.70 ab
Calcio3	1.17 a	7.26 a	16.1 b	12.8 bc	0.95 a	15.2 a	8.7 a	0.05 ab	18.4 ab	1.79 ab
Testigo	0.56 c	6.64 b	28.7 a	9.3 c	1.04 a	10.2 c	8.9 a	0.06 a	15.4 c	1.16 c
Yeso1	0.59 c	6.31 bc	22.4 ab	13.3 abc	0.96 a	11.8 bc	5.9 c	0.04 bc	18.9 a	2.00 ab
Yeso2	0.66 bc	6.27 c	17.7 b	15.7 ab	0.91 a	12.2 bc	7.2 bc	0.04 bc	18.4 ab	1.71 ab
Yeso3	1.09 a	6.13 c	16.8 b	18.7 a	0.87 a	12.8 ab	6.0 c	0.03 c	16.5 bc	2.13 a

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

7.1.5 Rentabilidad económica del experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas)

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable ingreso neto. Al realizar la prueba de comparación de medias, los tratamientos con base en carbonato de calcio se destacaron por encima de los demás tratamientos, presentando diferencias significativas a excepción del Calcio3.

La Tabla 7-4 resume el análisis económico de los tratamientos aplicados. El Calcio1 y Calcio2 incrementaron los costos totales en un 6 y 12 % respectivamente comparado con el testigo, estos se pueden visualizar detalladamente en el anexo F. No obstante, generaron los mayores rendimientos (12.5 TAH ton y 12 TAH) y mayores ingresos netos (29,271,163 y 27,321,163 COP).

En contraste, dosis máximas de carbonato de calcio como de yeso (Calcio3 y Yeso3) incrementaron los costos totales en un 17 y 29 % respectivamente y redujeron en un 25 y un 36 % los ingresos netos.

La menor dosis de carbonato de calcio mostró la mayor rentabilidad económica. Debido a esto, logró incrementar un 112 % los ingresos netos con respecto al testigo cuyo costo total fue el menor de todos los tratamientos.

Tabla 7-4: Rentabilidad económica de la plantilla a la aplicación de calcio.

Tratamiento	Rendimiento (ton.ha ⁻¹)	Ingreso total COP	Costo fijo COP	Costo variable COP	Costo total COP	Ingreso neto COP
Calcio1	12.50	37,500,000	1,509,106	6,719,731	8,228,837	29,271,163 a
Calcio2	12.00	36,000,000	1,509,106	7,169,731	8,678,837	27,321,163 ab
Calcio3	6.50	19,500,000	1,509,106	7,619,731	9,128,837	10,371,163 bc
Testigo	7.20	21,600,000	1,509,106	6,269,731	7,778,837	13,821,163 c
Yeso1	7.00	21,000,000	1,509,106	7,019,731	8,528,837	12,471,163 c
Yeso2	8.80	26,400,000	1,509,106	7,769,731	9,278,837	17,121,163 c
Yeso3	6.30	18,900,000	1,509,106	8,519,731	10,028,837	8,871,163 c

Nota: La rentabilidad económica fue calculada con una tasa representativa del mercado (TRM) para el mes de diciembre del 2023 de 3.954,14 COP (Banco de la República de Colombia, 2024). Los ingresos totales se calcularon con el precio pagado al agricultor de 3,000 COP por kg de azúcar en diciembre del 2023, teniendo en cuenta una inflación del 9.8 % para el 2023 (DANE, 2024). Por otra parte, este análisis económico no incluye los costos asociados al proceso de fábrica. Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Adaptado de Volke Haller y C. D. P. M. (1982).

1.1.6 Correlación de variables del experimento 1: plantillas (hacienda las Arditas)

El grupo de variables asociado a la productividad y el crecimiento se correlacionó significativamente con el contenido de fósforo foliar. En ese sentido, la altura de la caña, el número de tallos por metro lineal, el TCH y TAH incrementaron conforme aumentaba este nutriente en el tejido, con correlaciones de 0.61; 0.52; 0.47; 0.45, respectivamente. Por otra parte, el pH también evidenció una correlación directa con el TCH y el TAH, con correlaciones de 0.47 y 0.45, respectivamente. El anexo C detalla la matriz de correlación para las variables. Otros investigadores han reportado una respuesta positiva de la productividad y el crecimiento de la caña de azúcar asociada a incrementos en los contenidos de fósforo y el pH (Albuquerque *et al.*, 2016; Rossato *et al.*, 2017).

Los atributos asociados a las propiedades físicas del suelo se correlacionaron significativamente con el contenido de calcio en el tejido foliar, asimismo, presentaron una correlación inversa con la densidad aparente y los sólidos suspendidos (-0.50 y -0.63, respectivamente). La cantidad de sólidos suspendidos decreció conforme aumentó la

relación Ca:Mg y la conductividad eléctrica del suelo (correlaciones -0.48 y -0.58, respectivamente). Como se ha reportado, el calcio aumenta la estabilidad de los agregados y favorece la floculación y estructura de suelos con excesos de magnesio (Qadir *et al.*, 2018), en ese sentido, investigadores como Vyshpolsky *et al* (2008) proponen una relación directa entre la estabilidad de los agregados y la relación Ca:Mg.

Por otra parte, el pH, el sodio y el magnesio se correlacionaron inversamente con la porosidad (-0.48, -0.59 y -0.45), estos dos últimos presentaron leves correlaciones de forma directa (0.46 y 0.43 respectivamente) con altas tensiones de humedad del suelo (5 Bar). Estos resultados coinciden con los reportados por Rengasamy y Marchuk (2011), quienes señalaron que la relación del sodio y el magnesio en la fracción intercambiable del suelo puede reducir significativamente las propiedades hidráulicas.

El pH del suelo se correlacionó de forma directa con el contenido de calcio intercambiable y el magnesio foliar (0.51 y 0.73, respectivamente), en cambio, la correlación con el azufre fue inversa (-0.47). Mientras tanto, el incremento del fósforo en suelo coincidió con el aumento del contenido de calcio intercambiable y magnesio foliar, los cuales presentaron correlaciones de 0.51 y 0.73, respectivamente; por otra parte, el fósforo también evidenció una relación inversa con la concentración de azufre en el suelo y en el tejido (-0.47 y -0.75).

7.2 Experimento 2: socas (hacienda la Estrella)

7.2.1 Grupo de variables asociadas al crecimiento y a la productividad

Similar al experimento 1 (plantilla), el análisis de varianza evidenció diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable longitud del tallo. Al realizar la prueba de comparación de medias, el mayor valor se alcanzó con la menor dosis de carbonato (Calcio 1), presentando diferencias significativas respecto al testigo y la máxima dosis de yeso (Yeso3); por otra parte, la aplicación de sulfato de calcio no tuvo un efecto significativo respecto al testigo.

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable longitud del cogollo. Al realizar la prueba de comparación de medias, el mayor valor se alcanzó con la menor dosis de carbonato (Calcio1), presentando diferencias significativas respecto al testigo. Por otra parte, la aplicación de sulfato de calcio no tuvo un efecto significativo respecto al testigo.

El diámetro del tallo no presentó diferencias significativas; con un máximo de 26.9 cm y un mínimo de 26.1 cm. Este resultado se puede atribuir a la estabilidad de esta variable en CC 05-430.

Se presentaron diferencias significativas en la población de tallos por metro lineal. Al realizar la prueba de comparación de medias, el mayor valor se reportó en los tratamientos con carbonato de calcio, disminuyendo conforme aumenta la dosis hasta en un 2 %. Para el caso del yeso no presentó diferencias significativas con respecto al testigo, a excepción del Yeso 2 (3 ton yeso por ha); el cual incrementó la población de tallos por metro lineal un 5 %.

Según el análisis de varianza, los tratamientos evidenciaron diferencias significativas para la variable toneladas de caña por hectárea (TCH). La prueba de comparación de medias señala que la mayor productividad estuvo asociada al tratamiento Calcio1, el cual tuvo diferencias significativas con respecto a todos los tratamientos a excepción del Calcio2. Por otra parte, la aplicación de yeso no presenta diferencias significativas con respecto al testigo a excepción del Yeso 1.

Al igual que en el experimento 1 (plantilla) la productividad expresada como TCH y rendimiento de sacarosa, se redujo significativamente con las máximas dosis carbonato y de yeso. En ese sentido, otros investigadores señalan este crecimiento cuadrático de la productividad y la acumulación de azúcar en la caña, con aplicaciones de enmiendas ricas en calcio (Crusciol *et al.*, 2014). En esa misma línea, la mayor acumulación de sacarosa la presentó el Calcio 1, detectando diferencias significativas entre el testigo.

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable toneladas de azúcar por hectárea (TAH). Al realizar la prueba de comparación de medias, el calcio 1 logró incrementar su valor en promedio de 53 % respecto al testigo. El calcio 1 se destacó significativamente en crecimiento y productividad (Tabla 7-5), los resultados muestran una respuesta positiva sobre la longitud del tallo, longitud del cogollo, diámetro, población, TCH, rendimiento y TAH. Sin embargo, el crecimiento y la productividad se redujo conforme incrementaban las dosis de carbonato de calcio. En síntesis, estos resultados demuestran una respuesta positiva a la aplicación de 1.5 toneladas de carbonato de calcio y yeso por hectárea en socas de 3 cortes sobre las variables asociadas al crecimiento y la productividad de la variedad CC 05-430.

Tabla 7-5: Comparación de medias de las variables asociadas al crecimiento y a productividad.

Tratamiento	Longitud del tallo (cm)	Longitud de cogollo (cm)	Diámetro (mm)	Población de tallos (1m)	TCH	Rendimiento sacarosa (%)	TAH
Calcio1	168.4 a	34.5 a	26.9 a	12.7 a	96.53 a	11.10 a	11.14 a
Calcio2	162.8 ab	34.2 ab	26.1 a	12.7 a	95.46 a	10.03 ab	9.47 b
Calcio3	157.9 ab	34.1 ab	26.5 a	12.4 ab	81.65 c	9.85 b	7.95 c
Testigo	153.7 b	33.5 b	26.2 a	12.1 bc	76.62 c	9.76 b	7.26 c
Yeso1	160.9 ab	33.6 b	26.3 a	12.3 ab	88.91 b	10.57 ab	9.24 b
Yeso2	163.7 ab	33.9 ab	26.6 a	12.7 a	80.63 c	9.92 b	7.99 c
Yeso3	154.3 b	34.1 ab	26.4 a	11.8 c	80.09 c	10.34 ab	7.78 c

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

7.2.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar

El análisis de varianza detectó diferencias significativas entre tratamientos para el contenido de nitrógeno en el tejido foliar. En ese orden de ideas, la prueba de comparación de medias evidencia que la dosis máxima de yeso presentó diferencias significativas con respecto al Calcio2 con valores de 1.27 % y 1.22 % respectivamente. Por otra parte, ninguno de los tratamientos alcanzó el nivel óptimo referenciado por Cenicaña (2022) en esta variedad.

Para el caso del fósforo en el tejido, el análisis de varianza detectó diferencias significativas entre los tratamientos. Con base en la prueba de comparación de medias, se pudo identificar una tendencia decreciente conforme aumentaba las dosis, sin embargo, solo se apreciaron diferencias significativas entre el Calcio1 y Calcio3, con valores de 0.13 % y 0.08 % respectivamente, sin embargo, ninguno de los tratamientos logró alcanzar los niveles ideales reportados por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430. Este comportamiento coincide con los resultados del experimento 1 (plantilla), donde se apreciaron bajos contenidos del nutriente en las dosis más altas.

En ese sentido, toma fuerza la hipótesis de posibles pérdidas de fósforo asociados a procesos de fijación por altos contenidos de carbonato de calcio. Asimismo, está documentado el potencial que tiene el yeso para reducir la solubilidad del fósforo en suelos arcillosos, Ollikainen *et al* (2019) desarrollaron un proyecto piloto agroambiental a gran escala mediante el uso de yeso en los cultivos, con el objetivo de reducir su movilidad y recarga de fosfatos hacia el mar Báltico.

El análisis de varianza logró detectar diferencias significativas para la variable azufre. Según la prueba de comparación de medias, el contenido del nutriente en el tejido foliar presentó un incremento lineal conforme aumentaba la dosis de yeso, en ese sentido, el único tratamiento que logró alcanzar la concentración ideal para la variedad de caña CC 05-430 fue el Yeso3, con un valor de 0.064 %.

En efecto, estudios han demostrado que la aplicación de sulfatos mejora la disponibilidad del azufre en la caña (Ye *et al.*, 2011), así como la aplicación creciente de yeso aumenta la concentración del nutriente en el tejido foliar de otros cultivos (Nasser *et al.*, 2020).

Según el análisis de varianza, no se detectaron diferencias significativas para el contenido de potasio y magnesio en el tejido foliar entre los tratamientos. Por otra parte, sí se presentaron diferencias significativas para la variable de calcio y la relación Ca:Mg; la prueba de comparación de medias determinó que la dosis máxima de carbonato de calcio incrementó significativamente el contenido del nutriente en el tejido foliar con un valor de 0.34 %. Por otra parte, este tratamiento presentó la mayor relación Ca:Mg (1.95).

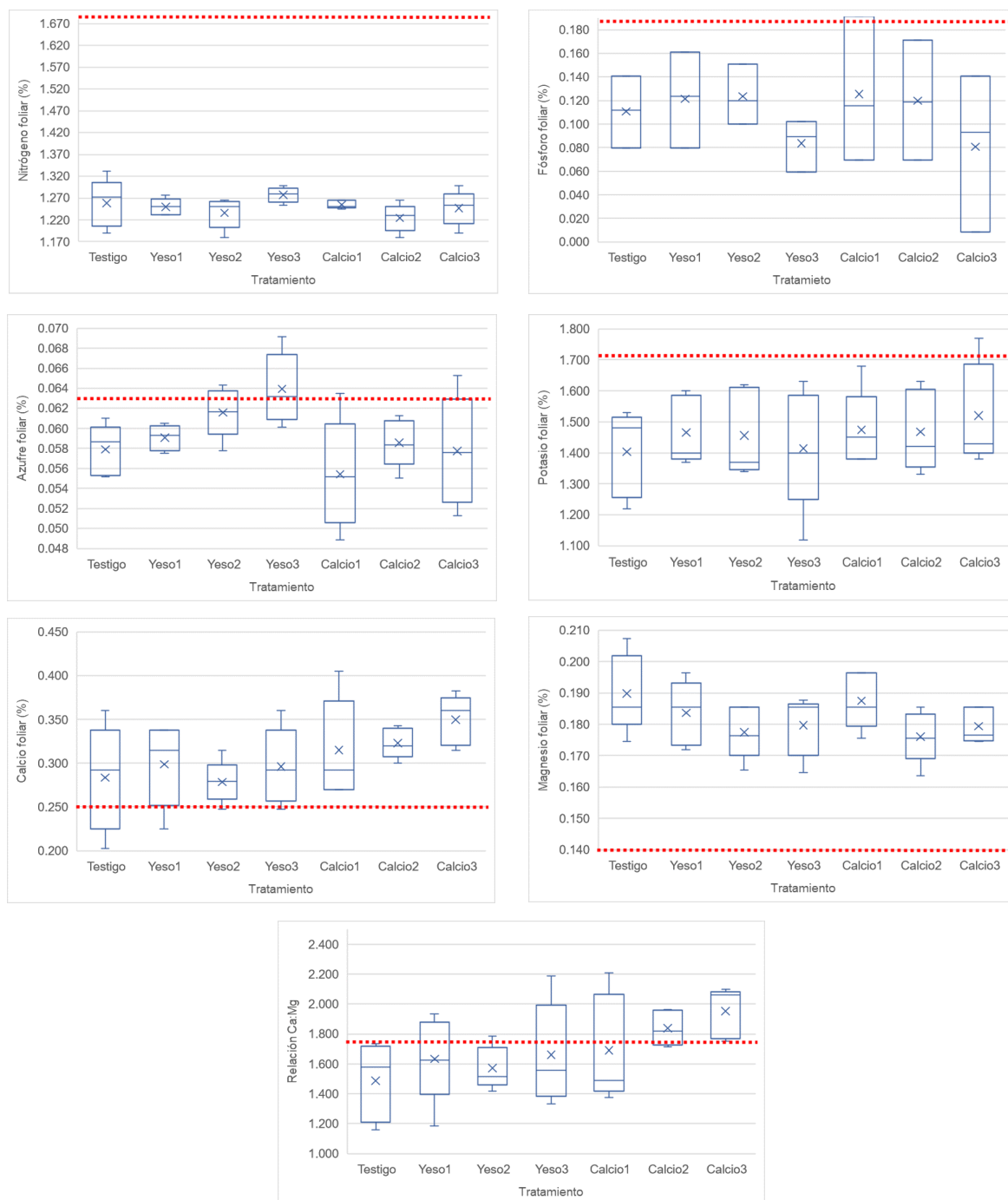
No obstante, todos los tratamientos estuvieron por encima de la concentración óptima de calcio (0.25 %) (Figura 7-6) reportada por Cenicaña para esta variedad (2022). En consecuencia, la respuesta en la productividad de los tratamientos no solamente se puede atribuir al aporte de calcio y su concentración en tejido; estos resultados coinciden con estudios similares que evaluaron el rendimiento de la caña de azúcar en función de enmiendas de calcio (McCray y Ji, 2018). La tabla 7-6 resume el contenido de nutrientes en el tejido foliar.

Tabla 7-6: Concentración de nutrientes en el tejido foliar en la soca.

Concentración en el tejido foliar (%)							
Tratamiento	N	P	S	K	Ca	Mg	Ca/Mg
Calcio1	1.25 ab	0.13 a	0.055 c	1.47 a	0.31 ab	0.18 a	1.69 ab
Calcio2	1.22 b	0.12 ab	0.058 bc	1.46 a	0.32 ab	0.17 a	1.83 ab
Calcio3	1.24 ab	0.08 b	0.057 bc	1.52 a	0.34 a	0.18 a	1.95 a
Testigo	1.25 ab	0.11 ab	0.057 bc	1.40 a	0.28 b	0.19 a	1.48 b
Yeso1	1.24 ab	0.12 ab	0.059 bc	1.46 a	0.29 ab	0.18 a	1.63 ab
Yeso2	1.23 ab	0.12 ab	0.061 ab	1.45 a	0.27 b	0.17 a	1.57 b
Yeso3	1.27 a	0.08 ab	0.064 a	1.41 a	0.29 ab	0.18 a	1.66 ab

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia

Figura 7-6: describe gráficamente la distribución de los nutrientes por tratamiento y su comparación con el nivel óptimo de referencia reportado por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430.



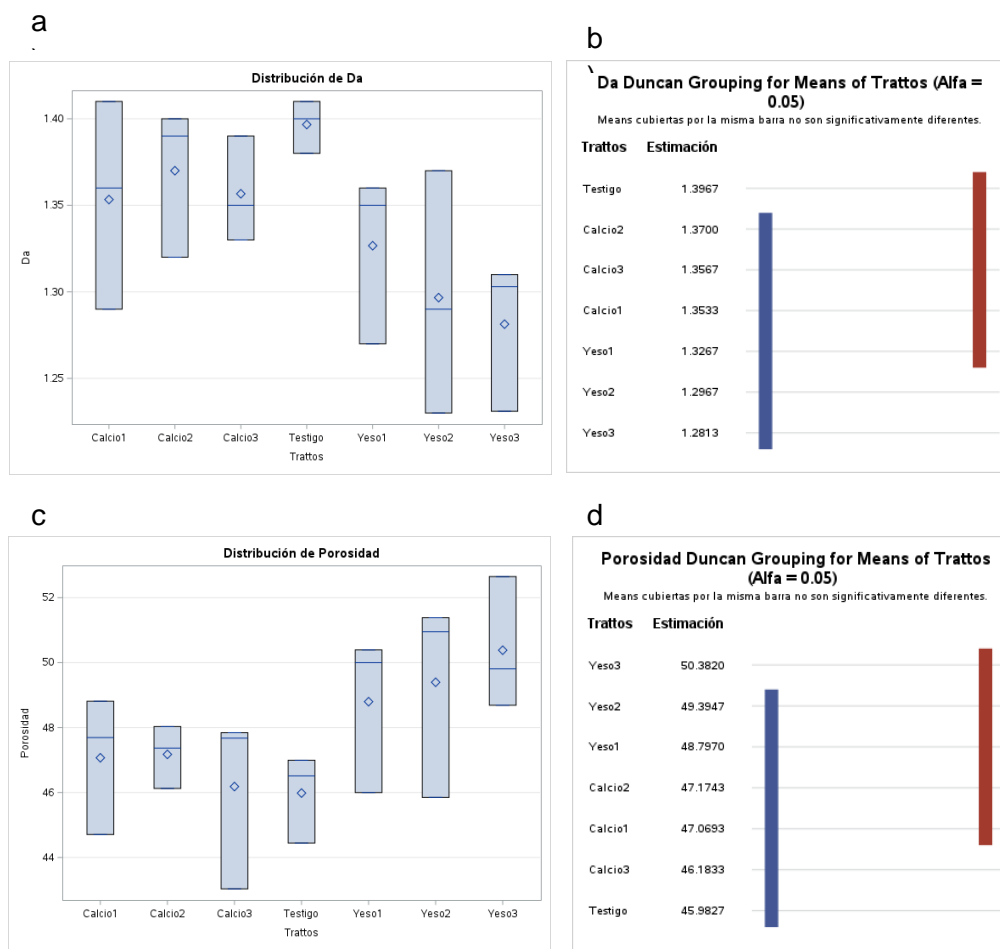
Nota: La línea punteada roja representa el nivel óptimo de referencia para la variedad. Elaboración propia.

7.2.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo

- Densidad aparente y porosidad

Al igual que en el experimento 1, se identificó, que la aplicación de yeso redujo significativamente la densidad aparente e incrementó la porosidad del suelo conforme aumentaba su dosis. Por otra parte, el carbonato de calcio no presentó diferencias significativas respecto al testigo (Figura 7-7).

Figura 7-7. a) Distribución de la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).



Nota: Elaboración propia.

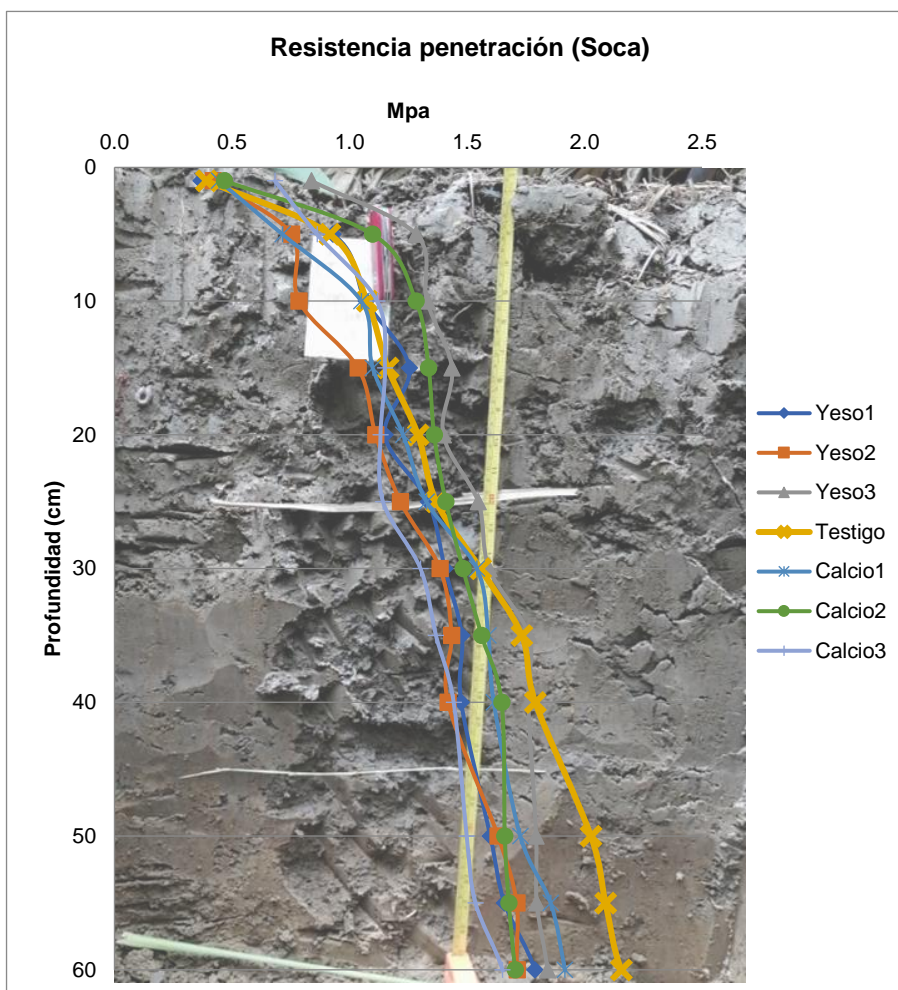
- Infiltración

Por otra parte, al igual que en el experimento 1 (plantillas), ninguno de los tratamientos en campo lograron infiltrar el suelo, estos resultados coinciden con los reportados por Garcia y Ocampo (2004), en áreas con altas saturaciones de Mg en el Valle geográfico del río Cauca; los cuales, observó que en núcleos de 5 cm después de varios días en agua, no lograron el punto de saturación debido a fuerzas de repulsión por el mismo suelo. En ese sentido, el efecto del exceso de magnesio sobre la infiltración del suelo degrada la estructura y reduce la tasa de infiltración en suelos expansivos, independiente de la concentración de carbonato de calcio aplicada (Keren, 1991).

- Resistencia a la penetración

Con respecto a la variable de resistencia a la penetración, en el caso de las socas se destaca que el testigo presentó un aumento a partir de los 40 cm (Figura 7-8). Si bien este testigo reporta mayores valores, es poco probable que este efecto se le atribuya a la aplicación de los tratamientos, ya que como se mencionó anteriormente, ninguna de las unidades experimentales logró infiltrar a tales profundidades.

Figura 7-8: Resistencia a la penetración en socas.

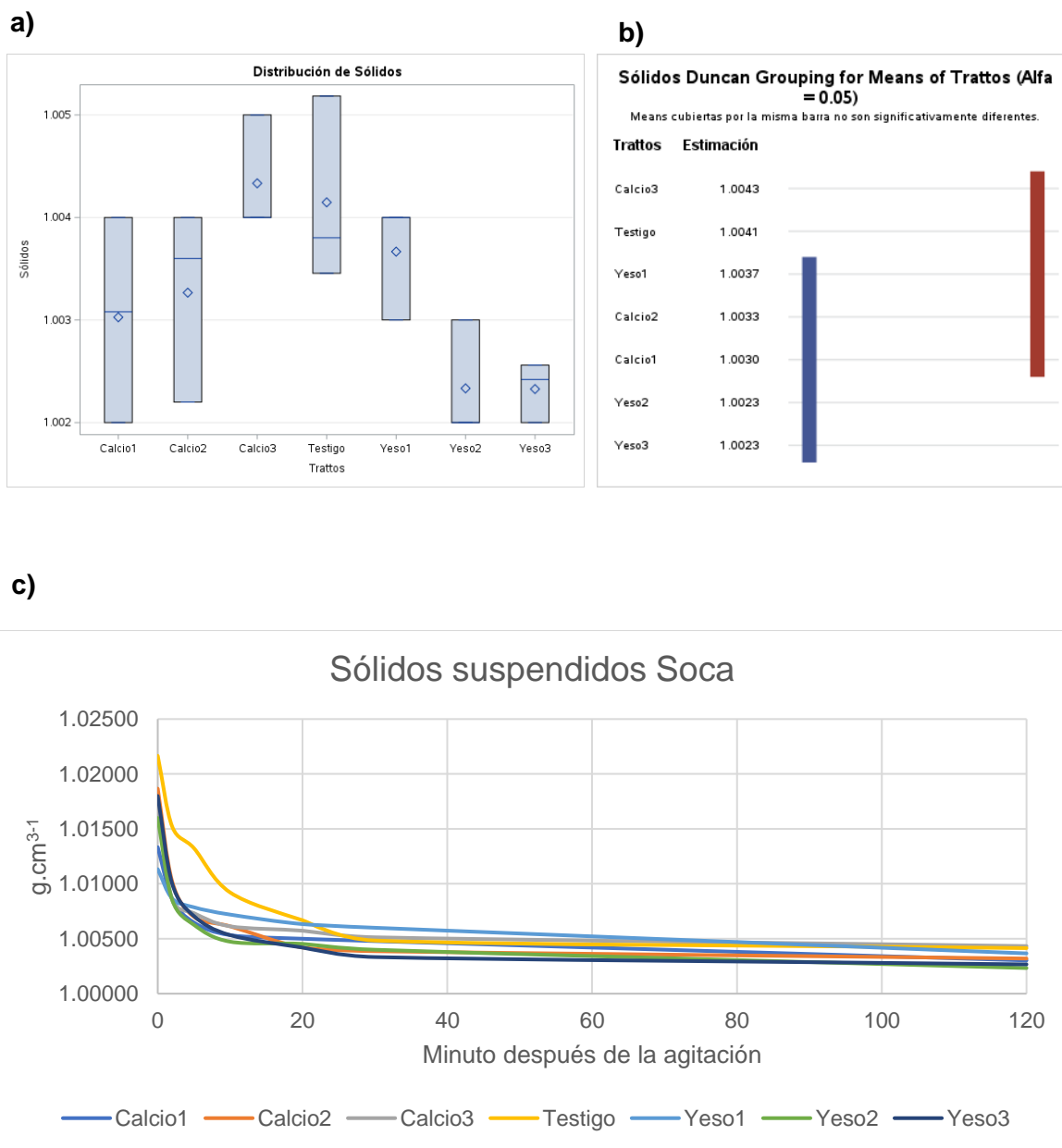


Nota: Elaboración propia.

- Sólidos suspendidos en la solución

En contraste con el experimento 1, el análisis de varianza logró detectar diferencias significativas entre los tratamientos para la cantidad de sólidos suspendidos en la solución, las dosis máximas de yeso reportaron la menor cantidad de sólidos. Por otra parte, La mayor turbidez y densidad de la solución la presentó la dosis máxima de carbonato (Calcio 3) y el testigo (Figura 7-9). Para tal efecto, esto se puede explicar gracias a que el exceso de magnesio debilita la estructura del suelo como consecuencia del hinchamiento excesivo y separación de los cristales de las arcillas (Zhang y Norton, 2002).

Figura 7-9: Sólidos suspendidos en socas. a) Distribución de la densidad de la solución ($\text{g}\cdot\text{cm}^3\text{-}^{-1}$). b) Prueba de medias ($\text{g}\cdot\text{cm}^3\text{-}^{-1}$). c) Precipitación de los sólidos en función al tiempo ($\text{g}\cdot\text{cm}^3\text{-}^{-1}$).

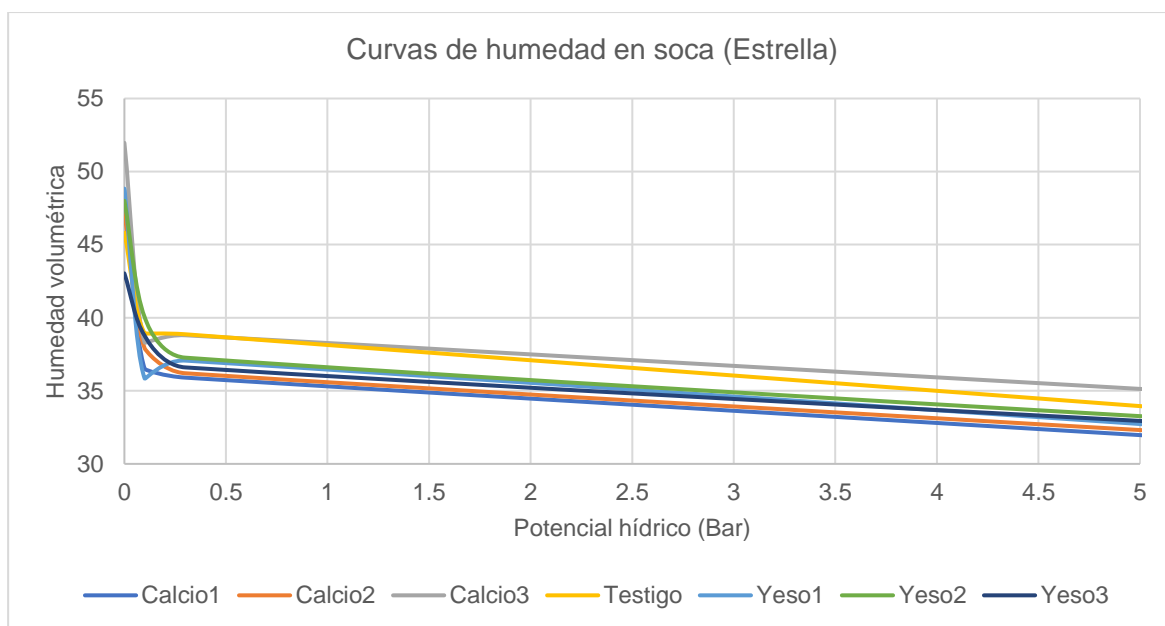


Nota: Elaboración propia.

- Potencial hídrico y humedad volumétrica

En esta localidad no es claro el comportamiento de las curvas de retención asociadas a los tratamientos. En ese sentido, el testigo y la dosis máxima de carbonato de calcio (Calcio3) reportaron mayor humedad volumétrica en todas las tensiones (Figura 7-10). Es de recordar que, las enmiendas no se incorporaron en el suelo debido a que en este experimento no se realizaron labores de adecuación del terreno como en las plantillas (experimento 1). De este modo, no es concluyente el efecto de las enmiendas sobre la retención de humedad de las socas.

Figura 7-10: Curvas de retención de humedad soca.



Nota: Elaboración propia.

7.2.4 Propiedades químicas del suelo

La Tabla 7-7 describe las propiedades químicas del suelo a la aplicación de carbonato y yeso sobre las socas. Según el análisis de varianza se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Las dosis más altas de carbonato de calcio incrementaron el pH, las cuales lograron evidenciar diferencias significativas entre los demás tratamientos. Del mismo modo, este comportamiento se repitió en el experimento 1 (plantillas), así como en otras investigaciones desarrolladas en suelos dedicados a la producción de caña de azúcar (Crusciol *et al.*, 2017; Pang *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2021).

Por otra parte, y al igual que en el experimento 1 (plantillas), el yeso redujo significativamente el pH del suelo. Para tal efecto, la acidificación del suelo asociada a la aplicación del yeso está reportada tanto en la caña de azúcar como en otros cultivos (Crusciol *et al.*, 2017; Melani *et al.*, 2021).

Todos los tratamientos incrementaron la conductividad eléctrica del suelo, sin embargo, las máximas dosis de carbonato y yeso lograron presentar diferencias significativas respecto al testigo. Así como en el experimento 1 (plantillas), Ferro *et al.* (2023) referencian la relación directa entre el contenido de calcio y la conductividad eléctrica del suelo. Por otra parte, otros investigadores como Zeyada *et al.* (2023) asocian este incremento con el carbonato de calcio, mientras que Melani *et al.* (2021) al yeso.

El contenido de fósforo en el suelo no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, no obstante, al igual que en el experimento 1 (plantillas), la absorción del fósforo por la planta disminuyó, evidenciando bajas concentraciones en el tejido foliar.

Así como en las plantillas (experimento 1), en las socas (experimento 2) se evidenció un incremento del azufre en el suelo conforme aumentaban las dosis de yeso, sin embargo, solo la máxima dosis logró alcanzar diferencias significativas respecto al testigo. En consecuencia, los dos experimentos acumularon mayor cantidad del nutriente en el tejido foliar. Vinculando a esto, investigadores que han aplicado yeso en la caña de azúcar también reportan incrementos en el contenido de azufre del suelo (Crusciol *et al.*, 2017) y la concentración en el tejido foliar (Nasser *et al.*, 2020).

En contraste con el experimento 1 (plantillas), no se evidenciaron cambios significativos para los contenidos de calcio, potasio y magnesio en el suelo; aun cuando varios reportes señalan que la aplicación de estos materiales modifican de manera sustancial los niveles de estos nutrientes (Bello *et al.*, 2021; Mahmoodabadi *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.*, 2021).

Una posible explicación a los resultados, puede ser la capacidad de amortiguamiento del suelo en la soca, ya que el muestreo se realizó una vez terminado el ciclo de la caña (13 meses después). Estudios desarrollados en el Valle geográfico del río Cauca, demostraron que la aplicación de dosis crecientes de carbonato de calcio tiene una relación directa sobre el incremento de calcio intercambiable del suelo; sin embargo, llegados los 6 meses de la aplicación, los contenidos retornaron a su condición inicial (Santaella Gutiérrez y González, 1965).

Por otra parte, para el contenido de sodio, las dosis máximas de carbonato de calcio presentaron diferencias significativas con respecto a las dosis máximas de yeso, con valores de 0.18 y 0.09 meq.100 g de suelo⁻¹ respectivamente. Si bien, Santaella y González (1965) reportaron que dosis crecientes de carbonato de calcio incrementan los niveles de sodio disponible en suelos del Valle geográfico del río Cauca, otros autores como León Sarmiento y Mantilla (2018) demostraron que aplicaciones de yeso en esta zona reducen significativamente su concentración.

El único tratamiento en el que se evidenciaron diferencias significativas con respecto al testigo en la relación Ca:Mg fue la dosis máxima de carbonato de calcio (4.5 ton.ha⁻¹); el cual incrementó un 34 % el valor de este atributo. Retomando los estudios de Santaella y González (1965), estos autores reportan un incremento de un 113 % en la relación Ca:Mg con la aplicación de 4 toneladas de carbonato de calcio en suelos ubicados en el valle geográfico del río Cauca.

Tabla 7-7: Propiedades químicas del suelo de la soca.

Tratamiento	CE	pH	P	S	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ca:Mg
	mS.cm-1		ppm			meq.100g-1				
Calcio1	0.48 cd	6.07 b	13.4 a	23.3 b	0.68 a	12.4 a	11.8 a	0.12 ab	22.0 a	1.06 b
Calcio2	0.48 cd	6.48 a	13.0 a	20.7 b	0.61 a	12.5 a	10.9 a	0.18 a	22.3 a	1.16 ab
Calcio3	0.46 cd	6.36 a	14.8 a	24.7 b	0.65 a	13.2 a	10.1 a	0.18 a	22.4 a	1.36 a
Testigo	0.38 d	6.01 b	12.7 a	24.7 b	0.58 a	11.6 a	11.5 a	0.17 ab	21.7 a	1.01 b
Yeso1	0.63 bc	5.9 bc	14.5 a	31.8 b	0.61 a	12.3 a	10.2 a	0.14 ab	22.0 a	1.22 ab
Yeso2	0.75 b	5.75 b	15.1 a	43.2 ab	0.64 a	11.7 a	10.6 a	0.13 ab	21.3 a	1.11 ab
Yeso3	1.02 a	5.68 b	13.6 a	67.8 a	0.64 a	12.3 a	11.2 a	0.09 b	23.4 a	1.12 ab

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

7.2.5 Rentabilidad económica del experimento 2: socas (hacienda la Estrella)

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable ingreso neto. Al realizar la prueba de comparación de medias, el Calcio1 reportó el mayor valor, y presentó diferencias significativas respecto a todos los tratamientos.

Los tratamientos Calcio1, Calcio2 y Yeso1 generaron los mayores rendimientos (10.6; 9.5; y 9.2 TAH respectivamente) y mayores ingresos netos (23,529,221; 19,743,725; y 19,188,587 COP, respectivamente). Por otra parte, la dosis máxima de yeso incrementó los costos totales en un 29 % y redujo en un 5 % los ingresos netos.

Así como en las plantillas (experimento 1), el análisis concluye que la menor dosis de carbonato de calcio evidenció la mayor rentabilidad económica. Debido a esto, este tratamiento logró incrementar un 68 % los ingresos netos respecto al testigo cuyo costo total fue el menor de todos los tratamientos. La tabla 7-8 detalla la rentabilidad económica de la soca a la aplicación del calcio.

Tabla 7-8: Rentabilidad económica de la soca a la aplicación de calcio.

Tratamiento	Rendimiento ton.ha ⁻¹	Ingreso total COP	Costo fijo COP	Costo variable COP	Costo total COP	Ingreso neto COP
Calcio1	10.59	31,758,058	1,509,106	6,719,731	8,228,837	23,529,221 a
Calcio2	9.47	28,422,562	1,509,106	7,169,731	8,678,837	19,743,725 b
Calcio3	7.95	23,841,820	1,509,106	7,619,731	9,128,837	14,712,983 b
Testigo	7.26	21,788,017	1,509,106	6,269,731	7,778,837	14,009,180 c
Yeso1	9.24	27,717,424	1,509,106	7,019,731	8,528,837	19,188,587 b
Yeso2	8.00	23,987,162	1,509,106	7,769,731	9,278,837	14,708,325 c
Yeso3	7.78	23,346,485	1,509,106	8,519,731	10,028,837	13,317,648 c

Nota: La rentabilidad económica fue calculada con una tasa representativa del mercado (TRM) para el mes de diciembre del 2023 de 3.954,14 COP (Banco de la República de Colombia, 2024). Los ingresos totales se calcularon con el precio pagado al agricultor de 3,000 COP por kg de azúcar en diciembre del 2023, teniendo en cuenta una inflación del 9.8 % para el 2023 (DANE, 2024). Por otra parte, este análisis económico no incluye los costos asociados al proceso de fábrica. Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Adaptado de Volke Haller y C. D. P. M. (1982).

7.2.6 Correlación de variables del experimento 2: socas (hacienda la Estrella)

La variable de productividad expresada como rendimiento o acumulación de sacarosa se correlacionó de forma directa con el contenido de fósforo y potasio en el suelo (0.57 y 0.63, respectivamente). La concentración de fósforo en el tejido foliar con el número de tallos por metro tuvo una correlación de 0.45; en ese sentido, El-Tilib *et al.* (2004) validaron la respuesta positiva del contenido de sacarosa y la población de tallos en la caña de azúcar a las aplicaciones de fósforo y potasio.

Por otra parte, la porosidad del suelo se correlacionó directamente con el contenido de azufre intercambiable (0.58), e inversamente con el pH y los sólidos en suspensión (-0.48 y -0.55). Al comparar estas evidencias, Vázquez (2017) señala el efecto de aniones como el azufre sobre la formación de pares iónicos, acompañados con cationes dispersantes como el sodio y el magnesio. Es posible que el aumento significativo de la porosidad y el drenaje como consecuencia de la aplicación del yeso, y la formación de pares iónicos entre

el sulfato aportado y los cationes dispersantes, hayan promovido la acidificación del suelo y la conservación de su estructura.

Se evidenció una correlación negativa entre el contenido de magnesio intercambiable y la concentración de fósforo intercambiable, fósforo foliar y potasio foliar con valores de -0.61, -0.57 y -0.67, respectivamente. Por tal efecto, el contenido de sacarosa pudo comprometerse por el exceso de magnesio y la baja absorción de fósforo y potasio. Pereira y Justino (2021) describen estas limitaciones del exceso de magnesio en el rendimiento de la sacarosa de la caña de azúcar.

1.3 Experimento 3: condiciones controladas (Contenedores)

7.3.1 Grupo de variables asociadas al crecimiento (número de macollas; altura y diámetro de la yagua; y longitud de la raíz), distribución y acumulación de materia seca (hoja; yagua; tallo; y raíz)

El análisis de varianza indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos para las variables de crecimiento y productividad. Según la prueba de comparación de medias al igual que en el experimento 1 y 2, los tratamientos con carbonato de calcio fueron los que mayor crecimiento presentaron y mayor materia seca acumularon (Tabla 7-9).

Tabla 7-9: Crecimiento y producción de materia seca.

Tratamiento	Macollas (Unidades)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Longitud raíz (cm)	Tallo (g)	Hoja (g)	Yagua (g)	Raíz (g)	Materia seca total (g)
Calcio1	17.0 ab	24.03 a	11.85 a	54.96 a	10.70 a	84.32 a	54.28 a	177.97 a	327.27 a
Calcio2	18.6 a	24.00 a	12.24 a	45.53 b	9.69 a	81.33 a	53.88 a	162.85 a	307.73 a
Calcio3	19.0 a	26.73 a	12.30 a	49.08 ab	11.22 a	98.59. a	50.95 ab	201.96 a	362.72 a
Testigo	16.2 ab	19.33 b	11.33 ab	35.28 c	4.56 b	56.09 b	35.65 c	116.39 b	212.70 b
Yeso1	14.4 b	24.12 a	11.66 a	47.36 b	4.41 b	58.66 b	36.98 bc	111.31 b	211.37 b
Yeso2	14.0 b	19.55 b	10.15 bc	42.19 bc	3.47 b	47.40 b	31.95 c	87.39 b	170.71 b
Yeso3	14.4 b	19.03 b	8.87 c	41.51 bc	3.42 b	45.54 b	25.68 c	90.07 b	164.71 b

Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

La aplicación de carbonato de calcio incrementó el número de macollas por contenedor, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas respecto al testigo. Por otra parte, la aplicación de yeso redujo un 14 % la producción de macollas.

La mayor altura por planta la presentó los tratamientos con carbonato, el cual evidenció diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos, a excepción de la dosis media de yeso (Yeso2). De igual manera que en los experimentos de campo (1 y 2), no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos para la variable diámetro de la

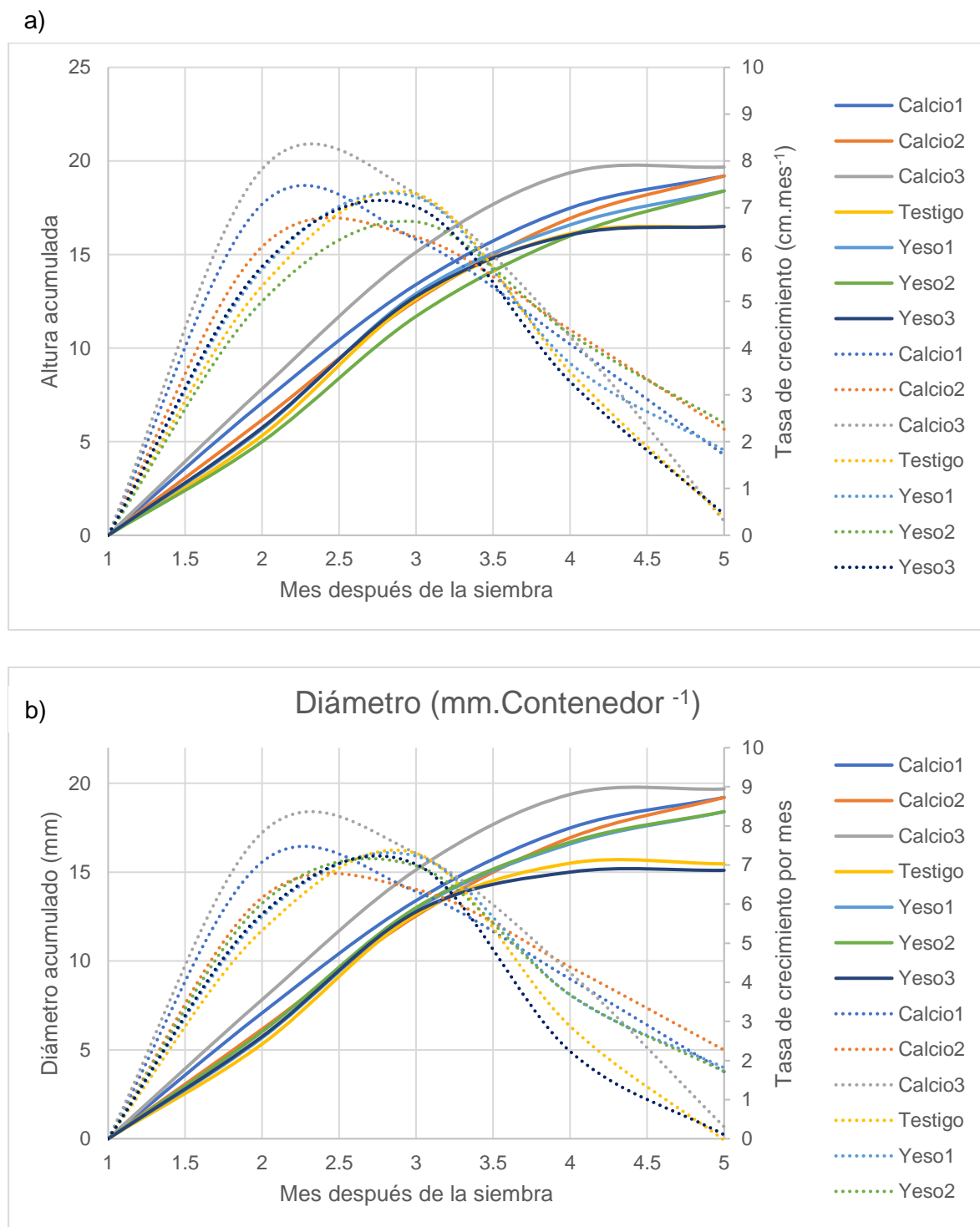
planta, a excepción del Yeso 3, esto valida la hipótesis de que estos resultados se pueden atribuir a la estabilidad de esta variable en la variedad CC 05-430.

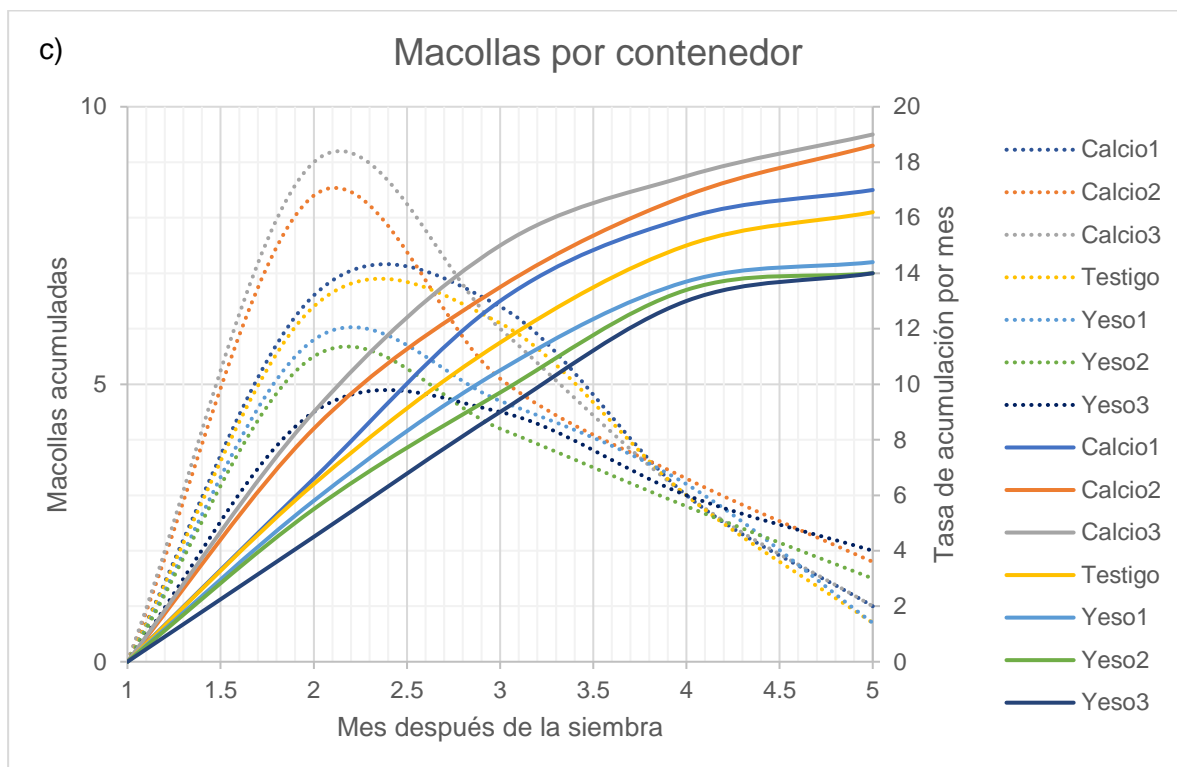
El análisis de varianza indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos para la longitud de la raíz. Según la prueba de comparación de medias todos los tratamientos presentaron diferencias significativas respecto al testigo a excepción del Yeso 2 y el Yeso 3. En ese sentido, estos resultados coinciden con estudios desarrollados en caña de azúcar por Clemente *et al* (2017), quienes reportaron la respuesta positiva del crecimiento de la raíz y el aumento de la densidad de este órgano con aplicación de calcio.

La tasa máxima de crecimiento expresada como altura y diámetro para los tratamientos con carbonato se ubicó entre los 2 y 2.5 meses después de la siembra; por otra parte, el máximo crecimiento del testigo y los tratamientos a base de yeso se expresó entre los 2.5 y 3 meses después de la siembra (Figura 7-11).

Una posible hipótesis a este comportamiento fue que la velocidad de crecimiento en los tratamientos con carbonato fue superior a los demás tratamientos, en consecuencia, su raíz logró ocupar en poco tiempo el volumen del contenedor, el cual limitó su desarrollo y detuvo la acumulación de biomasa. La máxima producción de macollas se alcanzó entre los 2 y 2.5 meses después de la siembra (Figura 7-11, literal "c").

Figura 7-11: Crecimiento: a) Altura de yaguas. b) Número de macollas. c) Diámetro de yaguas.





Nota: Elaboración propia.

El análisis de varianza para la acumulación de materia seca demostró diferencias entre los tratamientos. En ese sentido, la prueba de comparación de medias señala un incremento significativo con la aplicación de carbonato de calcio (Figura 7-2), así como el peso de las hojas, las yaguas, el tallo y la raíz. Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre las dosis. Estos resultados coinciden con estudios desarrollados por Vyshpolsky *et al* (2008), quienes lograron incrementar la productividad con la aplicación de calcio en un 67 % en suelos con exceso de magnesio ubicados en Kazajistán.

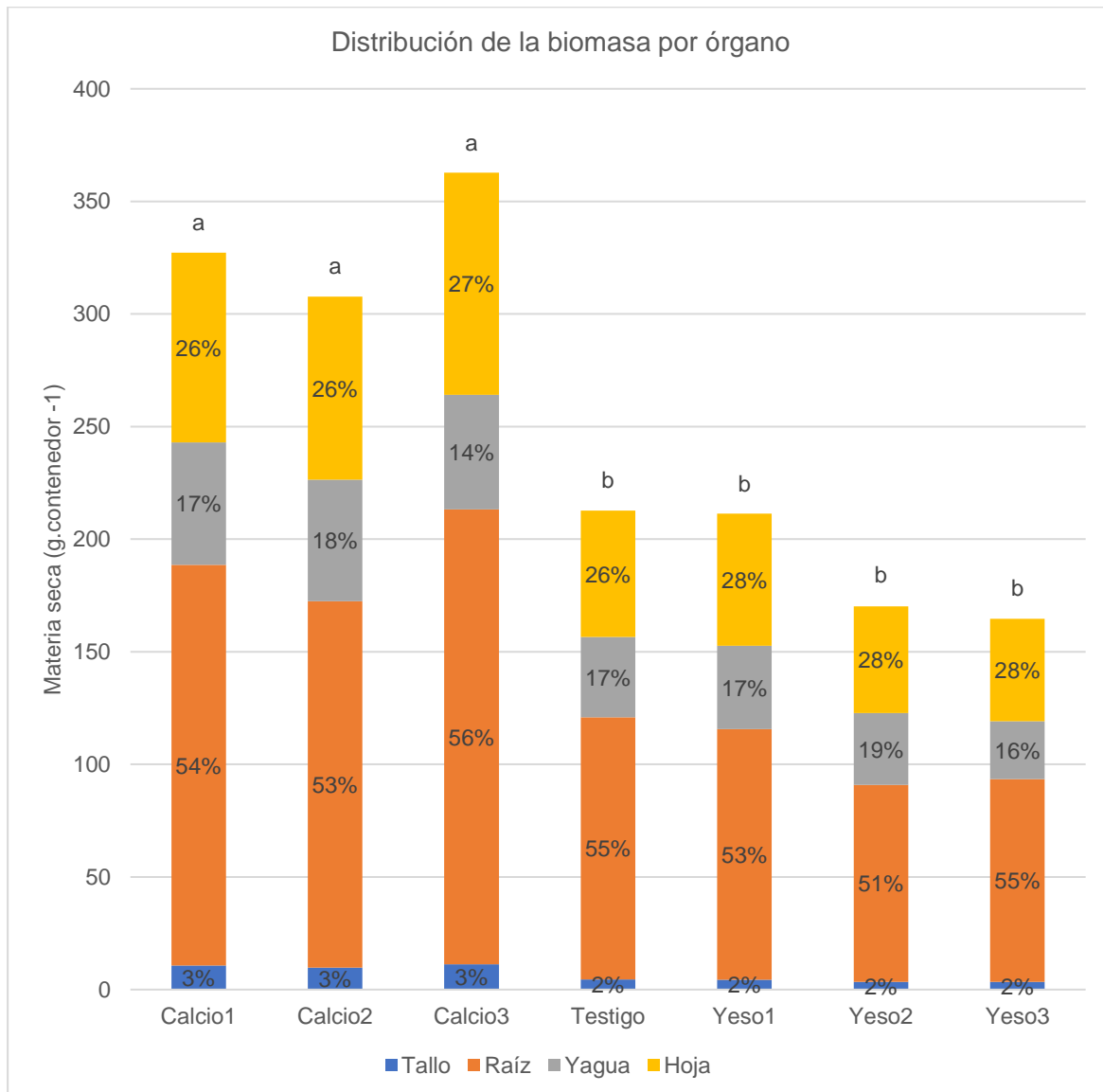
Por otra parte, ninguna de las dosis de yeso mostró diferencias significativas con respecto al testigo. Este comportamiento coincide con estudios asociados a la baja respuesta del yeso sobre la productividad de la caña de azúcar (Clemente *et al.*, 2017). No obstante, otras investigaciones señalan que tanto el yeso como el carbonato de calcio aumentan la productividad de esta planta (Crusciol *et al.*, 2017). En ese sentido, la respuesta de las

enmiendas se expresa bajo condiciones específicas de suelo, especialmente asociadas al pH.

En términos generales, la distribución de la materia seca de todos los tratamientos se concentró en la raíz, con un mínimo del 51 % y un máximo del 56 % (Figura 7-12). En ese orden de ideas, la aplicación de calcio no tuvo un efecto significativo en la distribución de la biomasa de la raíz y la parte aérea de la planta, estos resultados coinciden con los estudios desarrollados por García y Medina (2011) en suelos sin estructura dedicados a la producción de caña de azúcar bajo condiciones salinas, donde la materia seca se concentró hasta en un 64 % en el órgano radical.

Por último, la única parte que presentó diferencias en la distribución de la biomasa fue el tallo, los tratamientos basados en la aplicación de carbonato de calcio desarrollaron hasta un 50 % más de este órgano que el testigo y los tratamientos basados en yeso.

Figura 7-12: Distribución de la materia seca (%) por órgano en función a la aplicación de enmiendas.



Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

El uso del carbonato de calcio inherente a la dosis incrementó y aceleró la tasa de crecimiento, la producción de materia seca y la concentración de biomasa en el órgano cosechable (tallo). En consecuencia, este tratamiento resulta como una estrategia eficiente para el manejo de suelos con altas saturaciones de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar en el norte del Valle del Cauca; la figura 7-13 presenta gráficamente la comparación del desarrollo respecto al testigo.

Figura 7-13: Desarrollo del Calcio1 en comparación del testigo.



Nota: Elaboración propia.

7.3.2 Contenido de nutrientes en el tejido foliar

Así como en el experimento 1 (plantilla), el análisis de varianza no mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para el contenido de nitrógeno en el tejido foliar, con un máximo de 1.44 % y un mínimo de 1.22 %. En ese sentido, cabe resaltar que el suelo de los contenedores fue el mismo. Además, ninguno de los tratamientos logró alcanzar la concentración óptima (1.68 %) para la variedad.

Al mismo tiempo, el análisis de varianza tampoco detectó diferencias significativas para la variable fósforo. Sin embargo, y al igual que el experimento 1, la menor concentración del nutriente la presentó la dosis máxima de yeso (1.3 %), esto valida el efecto que tiene esta enmienda sobre la reducción de la solubilidad del nutriente (Kosenius y Ollikainen, 2019). Ahora bien, ninguno de los tratamientos logró alcanzar el nivel óptimo reportado por Cenicaña (2022).

El análisis de varianza logró detectar diferencias significativas para la variable azufre. Según la prueba de comparación de medias, y al igual que en los experimentos de campo 1 (plantillas) y 2 (socas), el contenido del nutriente en el tejido foliar presentó un incremento lineal conforme aumentaba la dosis de yeso. En ese sentido, el Yeso2 y Yeso3 lograron alcanzar los valores más altos para la concentración de azufre (0.682 y 0.683 % respectivamente), no obstante, todos los tratamientos alcanzaron el nivel óptimo (0.63%) reportado por Cenicaña (2022) a excepción del Calcio3 y del Testigo, los cuales obtuvieron un valor de 0.058 y 0.062 %.

Al igual que en los experimentos 1 y 2 (plantilla y soca), el análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre los tratamientos para la concentración de potasio en el tejido foliar. Para tal efecto, toma fuerza la hipótesis en que la aplicación de calcio no tiene un efecto de supresión sobre la absorción del K en la caña de azúcar, en tal sentido, así como lo plantea *as v et al* (2018), el efecto inhibitor del Ca sobre el K se ha sobreestimado históricamente para este cultivo. No obstante, ninguno de los tratamientos logró alcanzar el nivel óptimo de potasio en el tejido foliar reportado por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430.

El análisis de varianza para el contenido de magnesio en el tejido no presentó diferencias significativas. Sin embargo, todos los tratamientos alcanzaron la concentración óptima de la variedad (0.14 %) a excepción del Calcio1 y el Calcio3, con valores de 0.13 y 0.12 % respectivamente.

En contraste, el análisis de varianza para la relación Ca:Mg detectó diferencias significativas entre los tratamientos. En ese sentido, el testigo con un valor de 1.54, fue el único tratamiento que estuvo por debajo del nivel de referencia reportado por Cenicaña (1.78); según la prueba de comparación de medias, presentó diferencias significativas con respecto a todos los tratamientos a excepción del Calcio3. La tabla resume la prueba de comparación de medias de los nutrientes en el tejido foliar para los tratamientos. La tabla 7-10 resume el contenido de nutrientes en el tejido foliar.

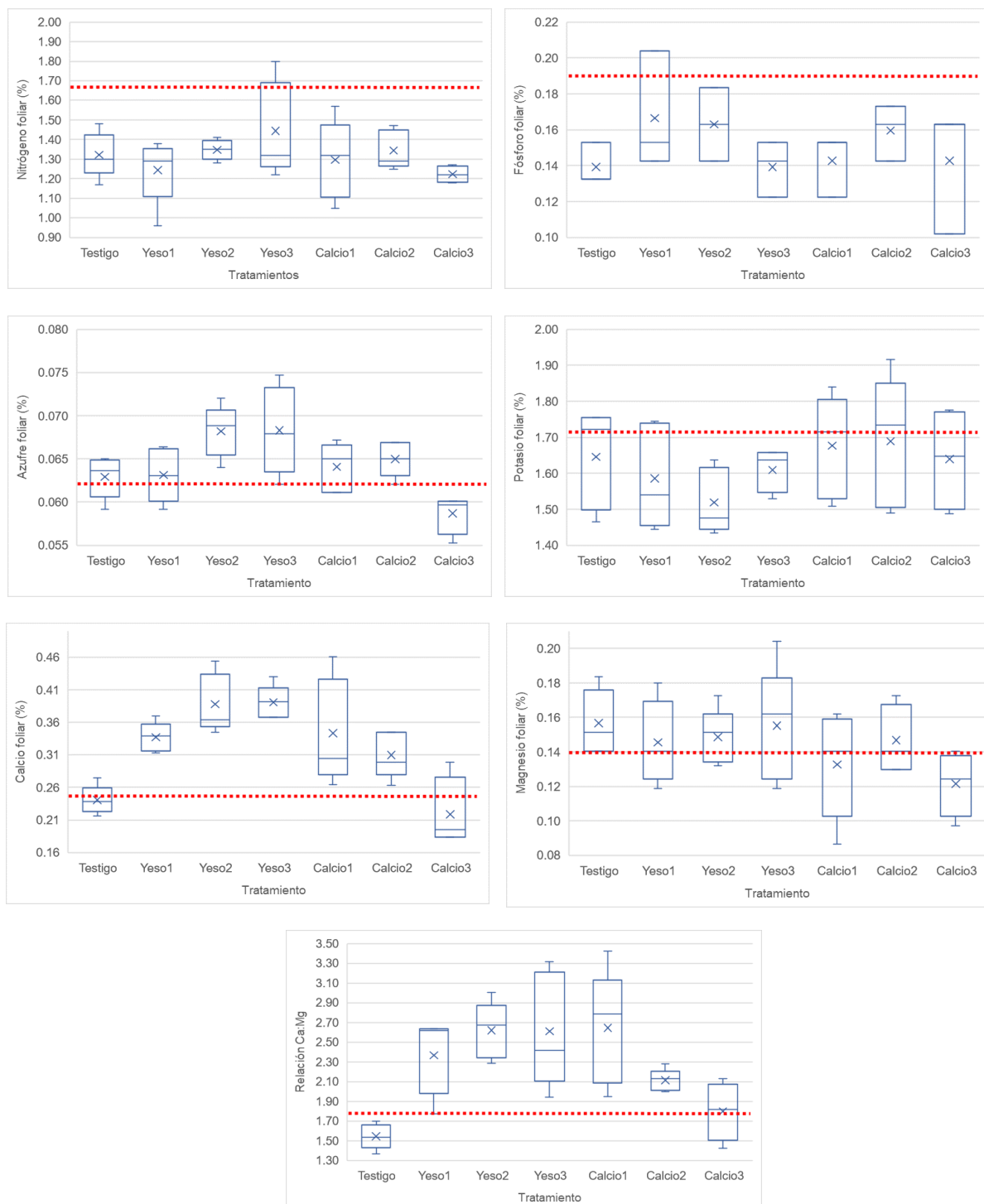
Tabla 7-10: Concentración de los nutrientes en el tejido foliar

Tratamiento	Concentración en el tejido foliar (%)						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Ca/Mg
Calcio1	1.29 a	0.14 a	0.064 ab	1.67 a	0.34 ab	0.13 a	2.64 a
Calcio2	1.34 a	0.15 a	0.064 ab	1.68 a	0.30 b	0.14 a	2.11 ab
Calcio3	1.22 a	0.14 a	0.058 b	1.63 a	0.21 c	0.12 a	1.79 bc
Testigo	1.32 a	0.13 a	0.062 b	1.64 a	0.24 c	0.15 a	1.54 c
Yeso1	1.24 a	0.16 a	0.063 b	1.58 a	0.33 ab	0.14 a	2.36 a
Yeso2	1.35 a	0.16 a	0.068 a	1.51 a	0.38 a	0.14 a	2.61 a
Yeso3	1.44 a	0.13 a	0.068 a	1.60 a	0.39 a	0.15 a	2.60 a

Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$).

La Figura 7-14 describe gráficamente la distribución de los nutrientes por tratamiento y su comparación con el nivel óptimo de referencia reportado por Cenicaña (2022) para la variedad CC 05-430.

Figura 7-14: Distribución de los nutrientes en el tejido por tratamiento en los contenedores y su relación con el nivel óptimo reportado por Cenicaña (2022).



Nota: La línea punteada roja representa el nivel óptimo de referencia para la variedad.
Elaboración propia.

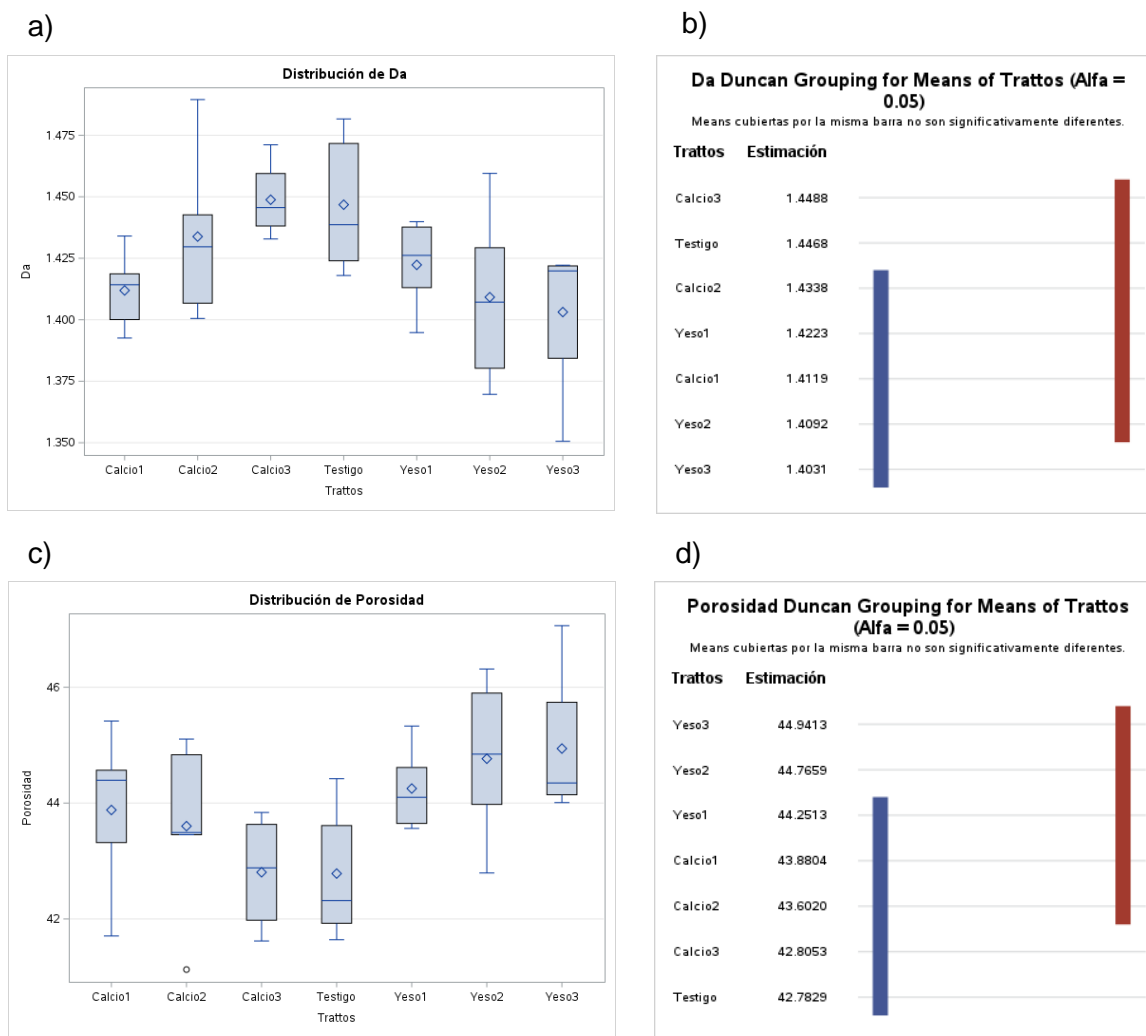
7.3.3 Grupo de variables asociadas a las propiedades físicas del suelo

- Densidad aparente y porosidad

Al igual que en los experimentos de campo (1 y 2), la aplicación de yeso redujo significativamente la densidad del suelo conforme incrementaba la dosis. Por otra parte, el carbonato de calcio no presentó diferencias significativas respecto al testigo.

De manera similar, la dosis máxima de yeso incrementó la porosidad del suelo en el experimento 1, 2 y 3, un 6; 9.5; y 5 % respectivamente, la cual evidenció diferencias significativas respecto al testigo (Figura 7-15). Por otra parte, el carbonato no afectó significativamente la porosidad. Así pues, los resultados demuestran el papel dominante que desempeña el calcio sobre el mantenimiento de la estructura y las propiedades físicas como la densidad aparente y la porosidad total, en ese orden de ideas, investigadores como Oster *et al* (2016) y Smith *et al* (2015) detallan los efectos positivos del calcio sobre la estructura y las propiedades hidráulicas del suelo en comparación con los demás cationes.

Figura 7-15. a) Distribución de la densidad aparente (g.cm^{-3}). b) Prueba de comparación de medias de la densidad aparente (g.cm^{-3}). c) Distribución de la porosidad (%). b) prueba de comparación de medias de la porosidad (%).



Nota: Elaboración propia.

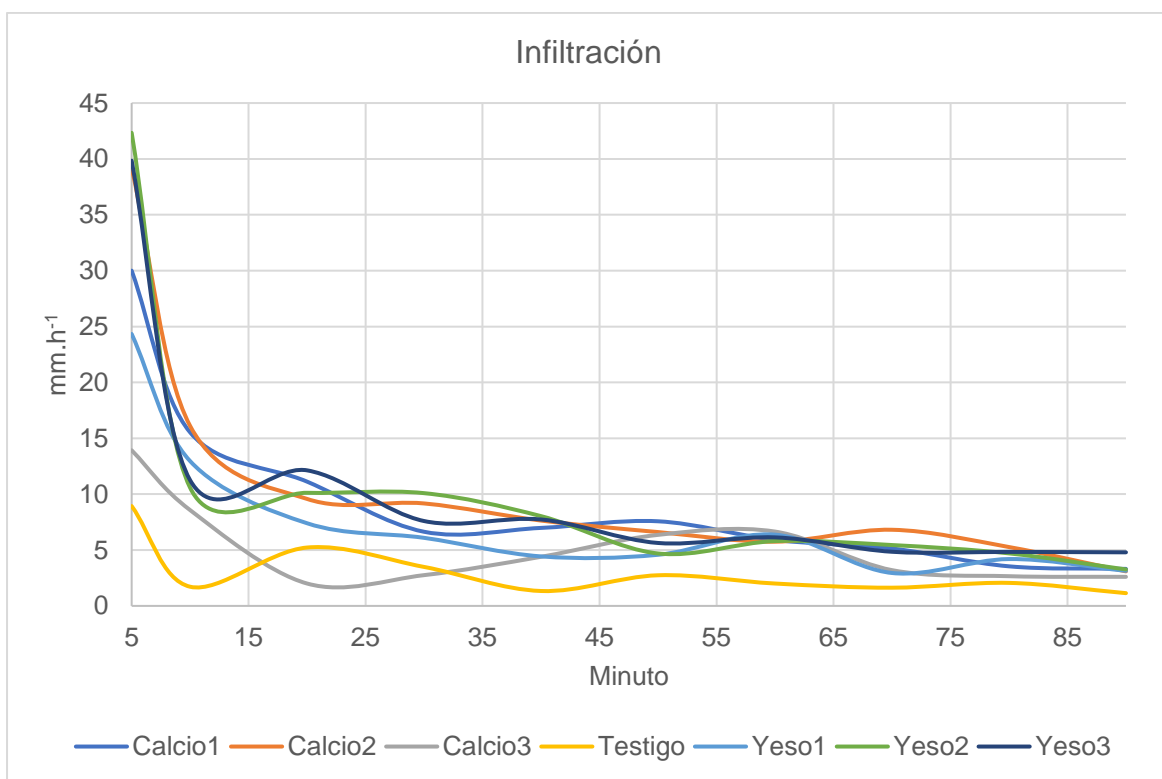
- Infiltración

Con respecto a la variable infiltración y en contraste con los experimentos en campo (plantilla y soca), todos los tratamientos presentaron diferencias significativas superiores al testigo. Asimismo, la infiltración de los contenedores asociados al Yeso3 fueron significativamente superiores a todos los tratamientos.

Autores como Chen y Dick (2011), Fisher (2011), Gabioud (2018), Zhu *et al*, 2019 coinciden que el calcio es uno de los elementos más usados como mejorador de la estructura de los agregados y los problemas físicos del suelo. Es bien sabido que la aplicación de yeso o carbonato de calcio solos o en mezcla promueven la floculación, condición esencial para la estabilización de la estructura que conlleva a un aumento de la infiltración y variables asociadas al movimiento del agua y el aire en suelo (Gabioud, 2018).

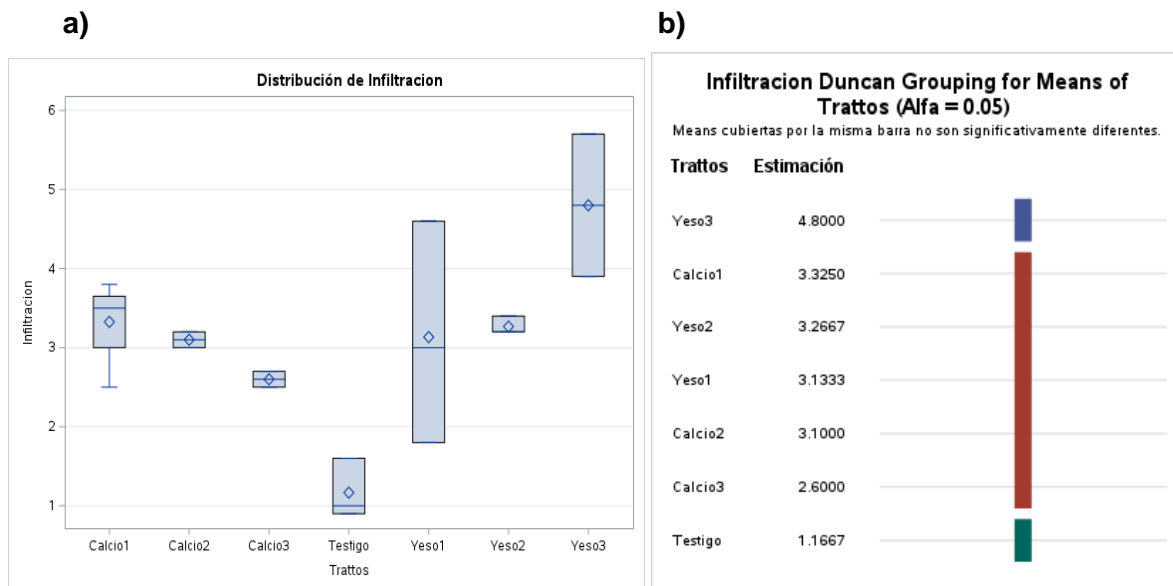
La Figura 7-16 presenta las curvas de infiltración correspondiente a cada tratamiento. Los resultados de este estudio demuestran que aporte de calcio aumentó significativamente la velocidad del movimiento del agua en el suelo (Figura 7-17); particularmente el yeso en una tasa más acelerada que el Carbonato de calcio, el cual, incrementó su velocidad a medida que aumentaba la dosis.

Figura 7-16: Velocidad de infiltración por tratamiento.



Nota: Elaboración propia.

Figura 7-17: a) Distribución de la infiltración ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). b) Prueba de medias para la infiltración básica ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

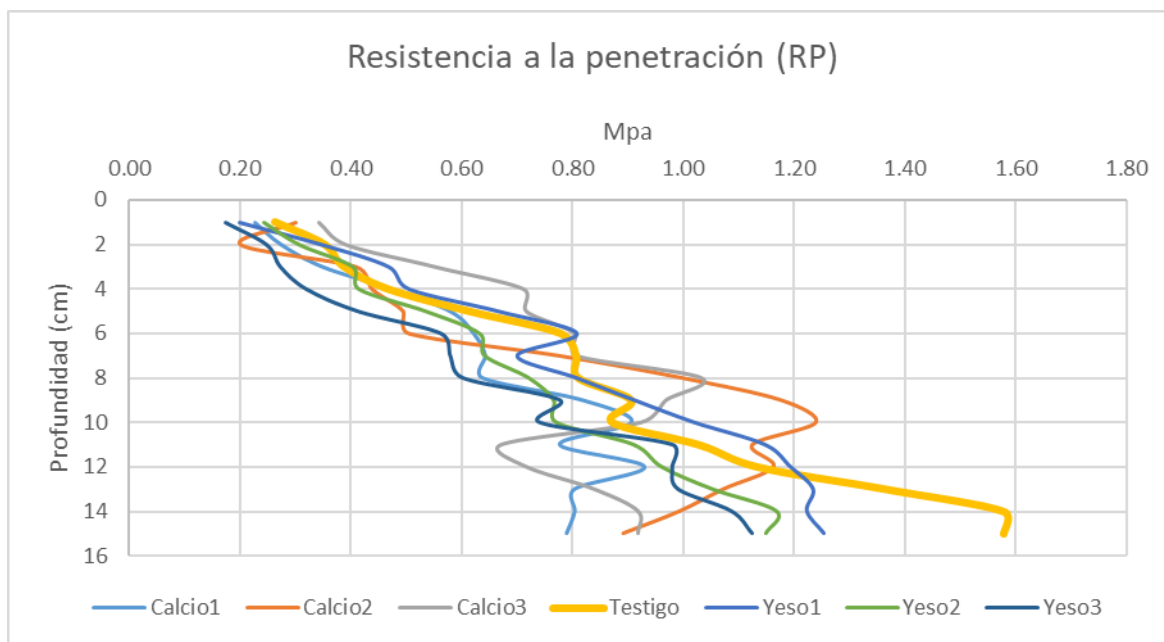


Nota: Elaboración propia.

- Resistencia a la penetración

La aplicación de Yeso y Carbonato de calcio disminuyeron la resistencia a la penetración del suelo, no obstante, el yeso logró obtener resultados más bajos y estables, mientras que el carbonato de calcio valores más fluctuantes (Figura 7-18).

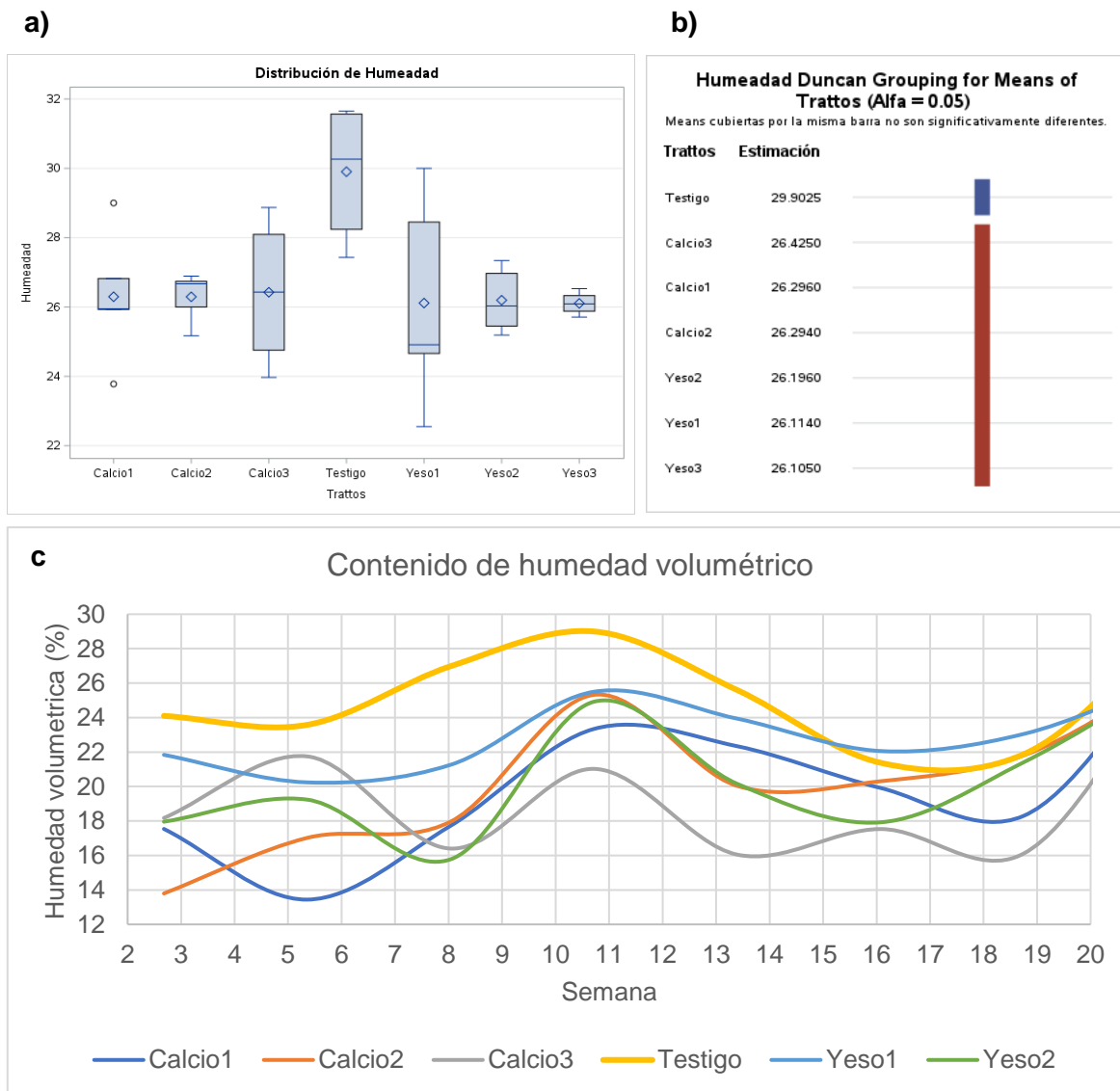
Las aplicaciones de enmiendas cálcicas modifican en gran medida los parámetros físicos del suelo, especialmente los asociados a la estructura, la densidad y la macroporosidad. En consecuencia, este puede aumentar la capacidad de exploración de la raíz por parte de la planta, estudios coinciden que el uso de enmiendas a base de calcio reduce la resistencia a la penetración y aumenta macroporosidad, así como la circulación del agua y del aire (Orellana & Pilatti, 1990). Por otra parte, según Moret y Herrero (2015) y Moret *et al* (2013), se debe tener cuidado con la aplicación excesiva de yeso, ya que si se excede su concentración, puede incrementar significativamente la impedancia mecánica del suelo.

Figura 7-18: a. Resistencia a la penetración.

Nota: Elaboración propia.

El mayor valor de humedad asociado a la resistencia a la penetración lo reportó el testigo, marcando una diferencia significativa respecto a todos los tratamientos. Adicionalmente, se monitoreó durante todo el ciclo del experimento la humedad volumétrica (Figura 7-19 literal "c"), marcando la misma tendencia. Si bien los suelos magnésicos tienen un alto potencial de retención de humedad debido a los efectos del mayor radio de hidratación en comparación a otros cationes (Zhang y Norton, 2002), la aplicación de enmiendas minerales en este tipo de suelos reduce de la capacidad de retención de humedad como consecuencia del aumento en la macroporosidad (Gabioud, 2018).

Figura 7-19: a) Distribución de la humedad gravimétrica (%) en el momento de la lectura de RP. b) prueba de medias para la humedad gravimétrica. c. Humedad volumétrica de todo el ciclo.



Nota: Elaboración propia.

- Sólidos suspendidos en la solución

Las investigaciones en plantillas (experimento 1) no lograron detectar diferencias entre los tratamientos, mientras que en socas (experimento 2) solo el Yeso2 y Yeso3 se diferenciaron significativamente del testigo. Por otra parte, la evaluación bajo condiciones controladas demostró cambios significativos de todos los tratamientos respecto al testigo. La menor cantidad de sólidos suspendidos en la solución de los contenedores las presentaron las dosis máximas de carbonato de calcio y yeso (Figura 7-20), lo cual indica que, bajo condiciones controladas tanto uno como el otro tiene la capacidad de flocular las partículas en forma de agregados más estables, en consecuencia, el uso de estos materiales impacta positivamente sobre la erodabilidad del suelo por acción del agua (Figura 7-21).

Existen dos formas en que las enmiendas pudieron unir y precipitar las partículas en la solución: La floculación por parte del Cation Ca^{2+} ofrecido por el yeso o las cales, y la cementación por los aniones generados en forma de carbonatos e hidroxilos (Safar & Whalen, 2023).

Figura 7-20: Sólidos suspendidos por tratamiento.

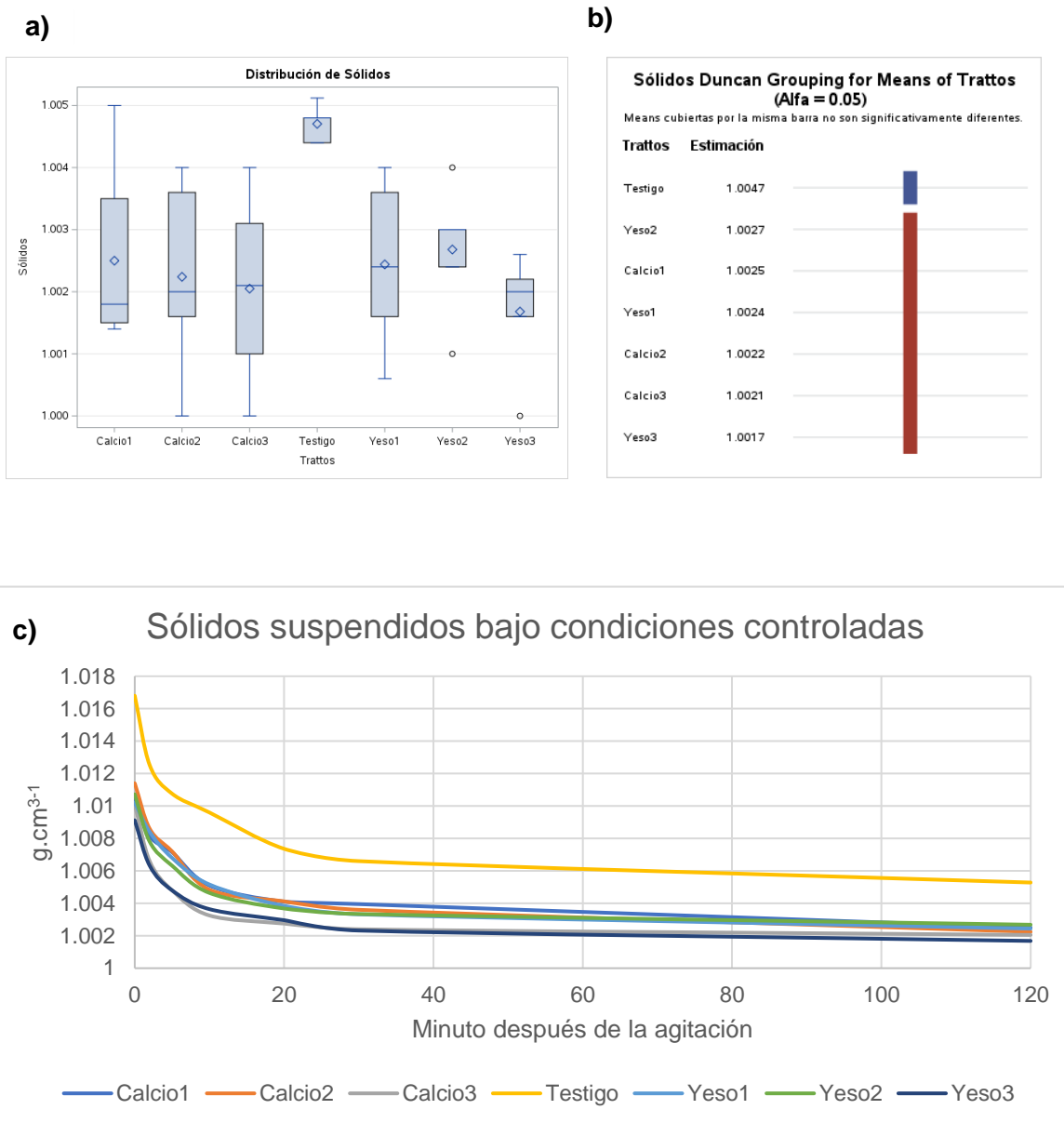


Nota: Elaboración propia.

Según Rowley *et al.* (2018) la floculación es un efecto puente entre el calcio y los sólidos del suelo que forman agregados estables, el grado de agregación depende de la concentración de calcio en la solución, el pH y la mineralogía de las arcillas. La caolinita por ejemplo, es un material 1:1 no expansible, por lo cual, tiene pocos sitios de intercambio que pueda unir a los cationes de Ca^{2+} , su floculación se da a una concentración inferior de $0,19 \text{ mmol kg}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ en un pH 5,5, por el contrario, arcillas expansibles 2:1 como la montmorillonitas (Materiales comunes en el Valle geográfico del río Cauca) floculan a una concentración de $1,1 \text{ mmol kg}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ en un pH 6.1 (Goldberg, 1987).

La cementación es un proceso de unión entre los macroagregados por dos tipos de sustancias: (1) el CaCO_3 precipitado a un pH alcalino (pH 7-10) y (2) la formación de gel rico en Silice, siendo la primera más representativa en los suelos del Norte del Valle del Cauca, esta ocurre cuando el HCO_3^- supera 1 mmol kg^{-1} y la concentración de Ca^{2+} está entre $1-1,5 \text{ mmol kg}^{-1}$ en una solución alcalina con $\text{pH} > 7$ (Ueckert *et al.*, 2020), si bien, las dos enmiendas disminuyeron los sólidos suspendidos en la solución, es probable que el grado de estabilidad de los agregados sea mayor en los tratamientos que tenían carbonato de calcio, como consecuencia de la cementación y aporte de HCO_3^- y iones hidroxilos que modificaron el pH.

Figura 7-21: Sólidos suspendidos en los contenedores bajo condiciones controladas: a. Distribución de la densidad de la solución ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). b. Prueba de medias. c. Precipitación de los sólidos en función al tiempo.



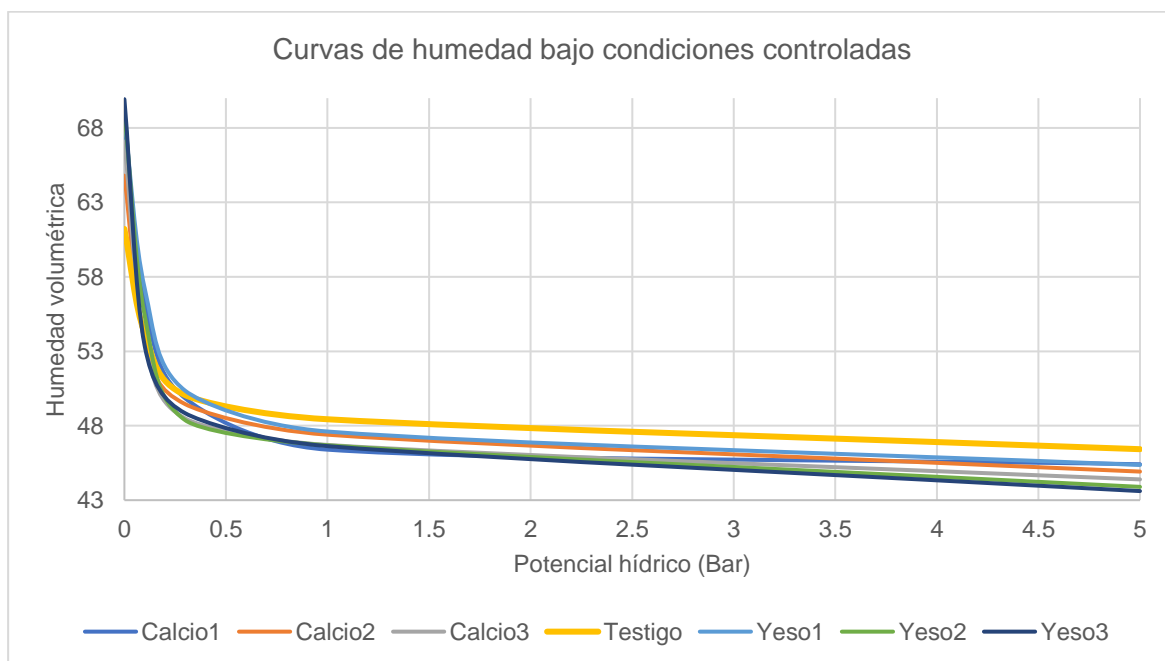
Nota: Elaboración propia.

- Potencial hídrico y la humedad volumétrica

Las enmiendas tuvieron un efecto sobre la floculación del suelo y la relación entre el contenido de agua y la energía con la cual fue retenida. El contenido de humedad y el espacio poroso de los macroagregados aumentó con la aplicación de calcio en zonas de baja succión (<0.1 Bar), adicionalmente, el experimento bajo condiciones controladas logró almacenar mayor cantidad de agua que la plantilla y la soca. Por otra parte, la humedad volumétrica del testigo fue mayor que todos los tratamientos en puntos de succión de mayor tenacidad (>-0.3 Bar), lo cual se asocia a la alta microporosidad y la baja disposición estructural para formar macroporos (Figura 7-22).

Como bien está reportado, estos suelos magnésicos del valle del cauca se encuentran limitados por la baja macroporosidad y alta capacidad de retención de humedad, adicionalmente, gran parte de los suelos sufren de degradación estructural asociada a la dispersión de arcillas (Garcia-Ocampo, 2004).

Figura 7-22: Curvas de retención de humedad



Nota: Elaboración propia.

7.3.4 Grupo de variables asociadas a las propiedades químicas del suelo

Según el análisis estadístico, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Para el caso del pH, y al igual que los experimentos en plantilla y soca (experimento 1 y 2), se presentó un incremento lineal y significativo conforme aumentaban las dosis de carbonato de calcio hasta un 20.6 % con respecto al testigo. Por otra parte, la aplicación de yeso redujo significativamente los valores del pH hasta un 8.4 %, con la particularidad que no se evidenciaron diferencias significativas entre los niveles de yeso.

Como se mencionó en los experimentos anteriores, está reportado el efecto del carbonato de calcio y el yeso sobre el pH de suelos dedicados a la producción de caña de azúcar y/o zonas cercanas al valle geográfico del río Cauca (Crusciol *et al.*, 2017; León Sarmiento y Mantilla, 2018; Pang *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2021; Santaella Gutiérrez y González, 1965).

A diferencia de las investigaciones en plantilla (experimento 1) y soca (experimento 2), el fósforo no se modificó significativamente con la aplicación de carbonato de calcio o yeso.

La aplicación de yeso en las plantillas (experimento 1), socas (experimento 2) y los contenedores bajo condiciones controladas (experimento 3), incrementaron significativamente los contenidos de azufre en el suelo. Así mismo, son varios los reportes que validan estos resultados en suelos de producción de caña y/o ubicados en el valle geográfico del río Cauca (Araujo *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2016; Bello *et al.*, 2021; Crusciol *et al.*, 2017; Nasser *et al.*, 2020; Rodrigues *et al.*, 2021).

Por otra parte, la aplicación de carbonato y de yeso incrementó significativamente los niveles de la conductividad eléctrica y el contenido de calcio en el suelo; en ese sentido, investigadores como Solís *et al* (2018) y Melani *et al* (2021) , han evidenciado la relación directa que existe entre el carbonato de calcio o el yeso sobre el incremento de estas dos variables

En contraste, la aplicación de las enmiendas redujo de forma significativa los niveles de magnesio y sodio, esto se debe al desplazamiento de los iones y la posterior adsorción del calcio en el complejo de cambio. En ese sentido, la consecuente floculación provocada por las enmiendas dio lugar a la formación de agregados que facilitaron el movimiento del agua y el lavado de iones dispersantes como el magnesio y el sodio.

Estos resultados coinciden con los reportados por León y Mantilla (2018), los cuales mediante columnas de suelos con exceso de magnesio dedicados a la producción de caña de azúcar, observaron también, una reducción del sodio y magnesio después de la aplicación de enmiendas cálcicas, posteriormente un incremento en la adsorción de calcio en el complejo de cambio.

Es claro que la aplicación de enmiendas aumentó significativamente los contenidos de calcio en el suelo y provocó la sustitución del magnesio en el complejo de cambio; en consecuencia, todos los tratamientos incrementaron significativamente la relación Ca:Mg (Tabla 7-11). Varios investigadores han validado el efecto positivo de la aplicación de calcio sobre suelos con exceso de magnesio (León Sarmiento y Mantilla, 2018; Qadir *et al.*, 2018; Vyshpolsky *et al.*, 2008), entre estos beneficios, destaca el incremento de la floculación, movilidad del agua y el consecuente balance de la relación Ca:Mg.

Tabla 7-11: Propiedades químicas del suelo de los contenedores.

Tratamiento	CE	pH	P	S	K	Ca	Mg	Na	CIC	Rel Ca:Mg
	mS.cm ⁻¹		Ppm			meq.100g ⁻¹				
Calcio1	0.36 b	6.4 c	18.2 a	10.6 c	0.61 a	9.1 b	8.38 bc	0.23 bcd	17.6 a	1.09 b
Calcio2	0.55 a	6.7 b	20.5 a	10.3 c	0.63 a	9.6 b	8.54 b	0.25 bcd	17.3 a	1.12 b
Calcio3	0.64 a	7.1 a	20.5 a	10.3 c	0.58 a	10.9 a	8.56 b	0.27 bc	17.6 a	1.28 a
Testigo	0.3 b	5.9 d	20 a	11.4 c	0.61 a	7.9 c	8.97 a	0.35 a	16.7 a	0.89 c
Yeso1	0.35 b	5.6 e	19.6 a	14.8 bc	0.60 a	8.6 bc	8.62 ab	0.29 ab	15.9 a	1.00 bc
Yeso2	0.55 a	5.5 e	17.7 a	16.0 ab	0.64 a	9.3 b	8.34 bc	0.21 cd	17.7 a	1.11 b
Yeso3	0.51 a	5.4 e	18.7 a	19.4 a	0.62 a	9.1 b	8.12 c	0.18 d	17.9 a	1.12 b

Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Elaboración propia.

7.3.5 Correlación de variables del experimento 3: contenedores bajo condiciones controladas

El crecimiento y el peso de todos los órganos se incrementaron significativamente con el pH; la población de macollas, altura de la yagua, diámetro de la yagua, peso del tallo, peso de la hoja, peso de la yagua, peso de la raíz y la materia seca total presentaron una relación directa con valores de 0.62; 0.48; 0.60; 0.69; 0.77; 0.65; 0.77; y 0.79, respectivamente.

Por su parte, la acumulación de la materia seca total se redujo significativamente con incrementos en el contenido de azufre intercambiable y la concentración de azufre y magnesio en el tejido foliar, los cuales presentaron correlaciones negativas de -0.65, -0.52 y -0.62 respectivamente. Experiencias reportadas por Wiedenfeld (2011) y Pereira Da Silva y Justino Chiaia (2021) coinciden en que los altos niveles de azufre reducen significativamente la productividad de la caña de azúcar. Qadir *et al.* (2018) describen detalladamente las implicaciones de la productividad que tiene el exceso de magnesio sobre los cultivos.

La estructura del suelo se deterioró significativamente con la presencia de altos niveles de sodio y magnesio intercambiables; la densidad aparente presentó una correlación directa con sodio y magnesio con valores de 0.60 y 0.58 respectivamente, mientras que la porosidad se redujo con valores de correlaciones de -0.62 y -0.63 respectivamente. Asimismo, la infiltración evidenció una relación inversa con el sodio y el magnesio intercambiable con valores de -0.45 y -0.44 de manera respectiva. Estos resultados coinciden con las afirmaciones de Rengasamy (2018), en las que señala el potencial de dispersión del sodio y el magnesio sobre las arcillas y la pérdida de la estructura.

Conclusiones

El flujo del calcio aportado al sistema promovió la floculación y conservación de la estructura del suelo de las plantillas, socas y contenedores. Incrementó la porosidad (2.3 % con el carbonato y un 6 % con el yeso) y redujo la densidad aparente (2 % con el carbonato y 2.3 % con el yeso). Sin embargo, solo se apreciaron cambios significativos de la infiltración en el experimento bajo condiciones controladas. El calcio se acumuló en la fracción intercambiable un 24 % más con el carbonato y 12 % más con el yeso. En consecuencia, el movimiento del nutriente tuvo como destino, incrementar un 16 % más su concentración en el tejido foliar para las dos enmiendas.

El calcio aportado por el carbonato y su efecto sobre suelos moderadamente ácidos con exceso de magnesio promovió el crecimiento y la productividad de la variedad CC 05-430. En promedio para todas las dosis de las plantillas, aumentó un 10 % la altura, un 3 % el diámetro y un 40 % la población de tallos, un 38 % el TCH y un 42 % el TAH. El efecto fue menor en socas, el cual incrementó la altura un 6 %, la población de tallos un 4 %, el TCH un 19% y el TAH un 31%. Por otra parte, la aplicación de yeso no presentó diferencias significativas en las variables de crecimiento y producción respecto al testigo.

La aplicación de 1.5 toneladas por hectárea de carbonato de calcio se consolidó como la dosis y fuente más eficiente del estudio. Para tal efecto, fue la dosis más baja y presentó el menor costo de todos los tratamientos (450.000 COP.ha⁻¹). También evidenció la mayor rentabilidad, con incrementos del 112 % de los ingresos netos en plantillas y el 68 % en socas.

La aplicación de yeso incrementó significativamente los niveles de azufre en el suelo (76 % promedio) y redujo la concentración del sodio y el magnesio un 7 % y 35 % respectivamente. En consecuencia, la floculación de partículas se estimuló gracias a la reducción de iones dispersantes (sodio y magnesio) y al incremento de iones floculantes como el calcio. La aplicación de yeso redujo el pH en todas las localidades un 6 %, mientras que el carbonato lo incrementó un 9 %, de este modo, la productividad presentó una correlación directa y significativa con dicho pH.

A. Anexo: descripción del perfil las Arditas (plantillas)

Variable	Descripción
Taxonomía	Vertic Haplustolls Familia franca fina
Símbolo unidad cartográfica	Consociación Palmeras PM8In
Localización geográfica	Departamento del Valle, municipio de Obando, Ingenio Risaralda, Hacienda Las Arditas
Altura sobre el nivel del mar	1.297 msnm
Coordenadas	4°32'41.48"N 75°59'46.85"W
Paisaje	Piedemonte
Tipo de relieve	Abanico
Forma de terreno	Cuerpo de abanico
Material parental	Sedimentos medios y finos
Grado de alteración	Medio
Relieve	Plano
Pendiente	0 - 3 %
Longitud	Larga
Forma	Rectilínea
Clima ambiental por piso térmico	Cálido seco
Formación ecológica según Holdridge	Bosque Seco Tropical
Clima edáfico	Isohipertérmica, ústico
Pedregosidad superficial	NO
Drenajes	Interno lento, externo lento, natural bien drenado.
Profundidad efectiva	Profundo.
Nivel freático	No aparece
Uso actual	Caña de azúcar
Horizontes diagnósticos	Mólico
Describió	Sebastián Martínez, Alfonso García, Laura Soto.

Nota. Elaboración propia.

Profundidad (cm)	Descripción
0 -15 cm (Ap)	Color en húmedo gris muy oscuro (2.5Y3/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y finos, fuertemente desarrollados, consistencia en húmedo friable en mojado pegajosa y plástica; abundantes raíces muy finas, finas y medias, vivas, de distribución normal, localizadas dentro y fuera de las unidades estructurales, Alta actividad de macroorganismos; límite entre horizontes abrupto y plano .
15 - 30 cm (A1)	color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2 con moteados por gleyzación y manchas de color pardo amarillento, y de pardo rojizo; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares finos y medios, fuertemente desarrollados; consistencia en húmedo friable en mojado pegajosa y plástica; pocas raíces finas, medias, algunas muertas, de distribución normal, localizadas dentro y fuera de las unidades estructurales, poca actividad de macroorganismos; límite entre horizonte abrupto y plano.
30 - 55cm (Bs)	color en húmedo pardo oscuro 2.5Y4/2 con manchas de pardo oliva 2.5Y5/4 y otras de pardo amarillento; textura Arcillo limosa a franco arcillo limosa; estructura en bloques angulares medio y finos, fuertemente desarrollados; consistencia en húmedo firme en mojado pegajosa y ligeramente plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte abrupto y plano.
55 - 75cm (BC)	color en húmedo pardo amarillento oscuro 10YR4/4 con manchas de pardo amarillento; textura Franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y débiles; consistencia en húmedo firme en mojado ligeramente pegajosa y plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte abrupto y plano.
75 - X (BC)	color en húmedo pardo oscuro 10YR4/3 con manchas de pardo amarillento; textura Franco limosa; estructura, sin estructura tiende a masiva; consistencia en húmedo friable en mojado ligeramente pegajosa y plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte abrupto y plano.

B. Anexo: descripción del perfil La Estrella (socas)

Variable	Descripción
Taxonomía	Typic Haplusterts Familia Fina
Símbolo unidad cartográfica	Consociación Corintias CT8In
Localización geográfica	Departamento del Valle, municipio de Obando, Ingenio Risaralda, Hacienda La Estrella
Altitud	1.662 msnm
Coordenadas	4°39'26.71"N 75°0'29.33"W
Paisaje	Piedemonte
Tipo de relieve	Abanico
Forma de terreno	Pie de abanico
Material parental	Sedimentos finos y muy finos
Grado de alteración	Medio
Relieve	Plano
Pendiente	0 – 3 %
Longitud	Larga
Forma	Rectilínea
Clima ambiental por piso térmico	Cálido seco
Formación ecológica según Holdridge	Bosque Seco Tropical
Clima edáfico	Isohipertérmica, ústico
Pedregosidad superficial	NO
Drenajes	Interno lento, externo lento, natural bien drenado.
Profundidad efectiva	Profundo.
Nivel freático	No aparece
Uso actual	Caña de azúcar
Horizontes diagnósticos	No se identificaron
Describió	Sebastián Martínez, Alfonso García, Laura Soto.

Profundidad	Descripción
0-32 cm (Ap)	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) con manchas de pardo rojizo; textura Arcillosa; estructura en bloques angulares, medios y finos, fuertemente desarrollados, consistencia en húmedo firme en mojado muy pegajoso y muy plástica; abundantes raíces muy finas, finas y medias, vivas, de distribución anormal, localizadas dentro y fuera de las unidades estructurales, Alta actividad de macroorganismos; límite entre horizontes irregular y plano.
32 - 58cm	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2 con manchas rojas, concreciones negras y algunas películas de translocación; textura arcillosa; estructura en bloques angulares medio y grandes, fuertemente desarrollados; consistencia en húmedo muy firme en mojado muy pegajosa y muy plástica; pocas raíces finas, medias, algunas muertas, de distribución anormal tienden a concentrarse en las huellas de las grietas, localizadas dentro y fuera de las unidades estructurales, poca actividad de macroorganismos; límite entre horizonte ondulado y plano.
58 - 80cm c	Color en húmedo pardo 2.5Y4/4 con manchas de pardo amarillento y pardo rojizo; textura Arcillosa; estructura en bloques subangulares medio y finos, moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable en mojado muy pegajosa y muy plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, tienden a concentrarse en las huellas de las grietas, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte ondulado y plano.
58 - 80cm	color en húmedo pardo 2.5Y4/4 con manchas de pardo amarillento y pardo rojizo; textura Arcillosa; estructura en bloques subangulares medio y finos, moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable en mojado muy pegajosa y muy plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, tienden a concentrarse en las huellas de las grietas, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte ondulado y plano.
80 - X (C)	80 - X (C) color en húmedo pardo amarillento oscuro 10YR4/4 con manchas de pardo rojizo; textura Arcillosa; estructura sin estructura, tiende a masivo; consistencia en húmedo friable en mojado muy pegajosa y muy plástica; muy pocas raíces finas, medias, muertas, de distribución anormal, no hay actividad de macroorganismos; límite entre horizonte ondulado y plano.
Observaciones:	En el segundo horizonte se identifican algunos recubrimientos en forma de película o cútanos, similares a los característicos del suelo Cartaguito (Vertic Haplustalfs fino).

C. Anexo: Coeficientes de correlación del experimento 1; plantillas (hacienda las Arditas)

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coeficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
Crecimiento y productividad	Altura del tallo	Fósforo foliar	0.6177	
	Población de tallos molinables	Fósforo foliar	0.52463	0.0211
		Potasio foliar	0.4273	0.068
		Calcio foliar	0.42935	0.0739
		pH	0.4211	0.0726
	Toneladas de caña por hectárea (TCH)	Fósforo foliar	0.46929	0.0427
		pH	0.46361	0.0456
		Fósforo intercambiable	0.4999	0.0293
	Toneladas de azúcar por hectárea (TAH)	Fósforo foliar	0.44726	0.0549
		pH	0.4486	0.054
		Fósforo intercambiable	0.49571	0.0309
	Contenido de nutrientes en el tejido	Fósforo	Altura del tallo	0.6177
Población de tallos			0.52463	0.0211
TCH			0.46929	0.0427
TAH			0.44726	0.0549
Azufre		Magnesio foliar	-0.70076	0.0004
		pH	-0.75396	<.0001
		Azufre	0.48899	0.0245
		Calcio intercambiable	-0.42469	0.055
		Magnesio intercambiable	-0.48002	0.0276
		Sodio intercambiable	-0.451	0.0402
Potasio		Altura del cogollo	0.46131	0.0468
		Población de tallos	0.4273	0.068
Calcio		Relación Ca:Mg foliar	0.86286	<.0001

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
		Sólidos suspendidos	-0.63946	0.0018
		Densidad aparente	-0.50111	0.0207
	Magnesio	Azufre foliar	-0.70076	0.0004
		Relación Ca:Mg foliar	-0.70647	0.0003
		Porosidad	-0.45333	0.039
		pH	0.73065	0.0002
		Fósforo intercambiable	0.55515	0.009
		Azufre	-0.45553	0.038
		Sodio intercambiable	0.48453	0.026
		Densidad aparente	0.42631	0.054
		Relación Ca/Mg	Calcio foliar	0.86286
	Magnesio foliar		-0.70647	0.0003
	Sólidos suspendidos		-0.64256	0.0017
	pH		-0.42809	0.0529
	Porosidad		0.49884	0.0213
Densidad aparente	-0.56943		0.0071	
Propiedades físicas del suelo	Densidad aparente	Calcio foliar	-0.50111	0.0207
		Relación Ca:Mg foliar	-0.56943	0.0071
		Sólidos suspendidos	0.45638	0.0376
		Sodio intercambiable	0.49542	0.0224
		CIC	-0.44298	0.0443
		Porosidad	-0.85209	<.0001
	Porosidad	Magnesio foliar	-0.45333	0.039
		Relación Ca:Mg foliar	0.49884	0.0213
		pH	-0.48156	0.0271
		Magnesio intercambiable	-0.45086	0.0455
		Sodio intercambiable	-0.59551	0.0044
		Densidad aparente	-0.85209	<.0001
	Humedad del suelo a 1 Bar	Magnesio intercambiable	0.47067	0.0313
		Sodio intercambiable	0.42891	0.0524
	Humedad del suelo a 5 Bar	Magnesio intercambiable	0.43405	0.0493
		Sodio intercambiable	0.46145	0.0352

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
	Sólidos suspendidos	Calcio foliar	-0.63946	0.0018
		Relación Ca:Mg foliar	-0.64256	0.0017
		CE	-0.57893	0.006
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.48198	0.0056
		Densidad aparente	0.45638	0.0376
Propiedades químicas del suelo	Calcio	Azufre foliar	-0.42469	0.055
		CE	0.53377	0.0127
		pH	0.51156	0.0178
	Magnesio	Azufre foliar	-0.48002	0.0276
		Sodio intercambiable	0.70402	0.0004
		Porosidad	-0.45086	0.0455
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.80504	<.0001
		Tensión 1 Bar	0.47067	0.0313
		Tensión 5 Bar	0.43405	0.0493
	Potasio	Altura del cogollo	-0.66546	0.0019
		Fósforo intercambiable	0.5297	0.0135
	Sodio	Azufre foliar	-0.451	0.0402
		Magnesio foliar	0.48453	0.026
		Azufre	-0.44161	0.0451
		Magnesio intercambiable	0.70402	0.0004
		Porosidad	-0.59551	0.0044
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.56753	0.0073
		Tensión 1 Bar	0.42891	0.0524
	Capacidad de intercambio catiónico	Densidad aparente	-0.44298	0.0443
	Conductividad eléctrica	Sólidos suspendidos	-0.57893	0.006
		Calcio intercambiable	0.53377	0.0127
	pH	TCH	0.46361	0.0456
		TAH	0.4486	0.054
		Azufre foliar	-0.75396	<.0001
		Magnesio foliar	0.73065	0.0002
		Azufre	-0.47592	0.0292
		Calcio intercambiable	0.51156	0.0178

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
		Magnesio intercambiable	0.42118	0.0572
		Porosidad	-0.48156	0.0271
		Sodio intercambiable	0.42357	0.0557
	Fósforo	TCH	0.46361	0.0456
		TAH	0.4486	0.054
		Azufre foliar	-0.75396	<.0001
		Magnesio foliar	0.73065	0.0002
		Azufre	-0.47592	0.0292
		Calcio intercambiable	0.51156	0.0178
		Magnesio intercambiable	0.42118	0.0572
		Sodio intercambiable	0.42357	0.0557
	Azufre	Azufre foliar	0.48899	0.0245
		Magnesio foliar	-0.45553	0.038
		pH	-0.47592	0.0292
		Sodio intercambiable	-0.44161	0.0451
	Relación Ca:Mg	Sólidos suspendidos	-0.48198	0.0269
		Fósforo intercambiable	-0.44048	0.0457
		Magnesio intercambiable	-0.80504	<.0001
		Sodio intercambiable	-0.56753	0.0073

D. Anexo: coeficientes de correlación del experimento 2; socas (hacienda la Estrella)

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
Crecimiento y productividad	Altura cogollo	Potasio intercambiable	0.46481	0.0338
		Tensión 0.3 Bar	-0.59049	0.0048
	Población de tallos molinables	Fósforo foliar	0.45339	0.039
		CIC	-0.61698	0.0029
	Rendimiento (Sacarosa)	Nitrógeno foliar	0.53922	0.0117
		CE	0.59206	0.0047
		Fósforo intercambiable	0.57895	0.006
		Potasio intercambiable	0.63985	0.0018
		Saturación	-0.47576	0.0293
		Tensión 0.3 Bar	-0.46073	0.0356
Contenido de nutrientes en el tejido	Nitrógeno	Rendimiento sacarosa	0.53922	0.0117
		CE	0.49755	0.0217
		Potasio intercambiable	0.55229	0.0094
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.45746	0.0371
	Fósforo	Población de tallos	0.45339	0.039
		Potasio foliar	0.47729	0.0287
		Calcio intercambiable	-0.67171	0.0009
		Magnesio intercambiable	-0.56733	0.0073
		Tensión 0.1 Bar	-0.44306	0.0443
	Azufre	CE	0.44312	0.0442
		Saturación	-0.48121	0.0272
		Tensión 0.1 Bar	0.44705	0.0422
	Potasio	Fósforo foliar	0.47729	0.0287
		Calcio foliar	0.44833	0.0069
		Relación Ca:Mg foliar	0.44762	0.007

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
		Fósforo intercambiable	0.51111	0.0179
		Magnesio intercambiable	-0.67864	0.0007
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.72894	0.0002
		Saturación	0.49121	0.0237
		Tensión 0.1 Bar	-0.65721	0.0012
		Tensión 0.3 Bar	-0.53242	0.013
	Calcio	Potasio foliar	0.44833	0.0069
		Relación Ca:Mg foliar	0.94332	<.0001
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.57372	0.0065
	Relación Ca/Mg	Potasio foliar	0.44762	0.007
		Calcio foliar	0.94332	<.0001
		pH	0.42889	0.0524
		Sodio intercambiable	0.44403	0.0437
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.53205	0.013
	Propiedades físicas del suelo	Densidad aparente	TAH	0.48859
Tensión 5 Bar			-0.49638	0.0221
Porosidad			-0.84874	<.0001
Porosidad		Sólidos suspendidos	-0.55368	0.0092
		CE	0.44202	0.0448
		pH	-0.48968	0.0242
		Azufre intercambiable	0.58137	0.0057
		Densidad aparente	-0.84874	<.0001
Humedad del suelo a saturación		Azufre foliar	-0.48121	0.0272
		Potasio foliar	0.49121	0.0237
		CE	-0.58292	0.0055
Humedad del suelo a 0.1 Bar		Fósforo foliar	-0.44306	0.0443
		Azufre foliar	0.44705	0.0422
		Potasio foliar	-0.65721	0.0012
		Calcio intercambiable	0.49875	0.0214
		Magnesio intercambiable	0.59718	0.0043
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.40744	0.0668
		Altura del cogollo	-0.59049	0.0048

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
	Humedad del suelo a 0.3 Bar	Rendimiento sacarosa	-0.46073	0.0356
		Nitrógeno foliar	-0.46089	0.0355
		Potasio foliar	-0.53242	0.013
		Fósforo intercambiable	-0.63289	0.0021
		Potasio intercambiable	-0.62184	0.0026
		Magnesio intercambiable	0.46721	0.0327
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.45094	0.0402
	Humedad del suelo a 1 Bar	Fósforo foliar	-0.44306	0.0443
		Azufre foliar	0.44705	0.0422
		Potasio foliar	-0.65721	0.0012
		Calcio intercambiable	0.49875	0.0214
		Magnesio intercambiable	0.59718	0.0043
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.40744	0.0668
	Humedad del suelo a 5 Bar	Calcio intercambiable	0.47264	0.0305
		Densidad aparente	-0.49638	0.0221
	Sólidos suspendidos	CE	-0.64037	0.0018
		pH	0.46671	0.0329
		Porosidad	-0.55368	0.0092
		Azufre	-0.62469	0.0025
	Propiedades químicas del suelo	Calcio	Fósforo foliar	-0.67171
Magnesio intercambiable			0.7766	<.0001
Tensión 0.1 Bar			0.49875	0.0214
Tensión 5 Bar			0.47264	0.0305
Magnesio		Fósforo foliar	-0.56733	0.0073
		Potasio foliar	-0.67864	0.0007
		Fósforo intercambiable	-0.61396	0.0031
		Calcio intercambiable	0.7766	<.0001
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.7308	0.0002
		Tensión 0.1 Bar	0.59718	0.0043
		Tensión 0.3 Bar	0.46721	0.0327

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
	Potasio	Altura del cogollo	0.46481	0.0338
		Rendimiento sacarosa	0.63985	0.0018
		Nitrógeno foliar	0.55229	0.0094
		CE	0.42154	0.057
		Fósforo intercambiable	0.83433	<.0001
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.50533	0.0195
		Tensión 0.3 Bar	-0.62184	0.0026
	Conductividad eléctrica	Rendimiento sacarosa	0.59206	0.0047
		Nitrógeno foliar	0.49755	0.0217
		Azufre foliar	0.44312	0.0442
		Sólidos suspendidos	-0.64037	0.0018
		pH	-0.66492	0.001
		Fósforo intercambiable	0.45981	0.036
		Azufre	0.89158	<.0001
		Potasio intercambiable	0.42154	0.057
		Porosidad	0.44202	0.0448
		Saturación	-0.58292	0.0055
	pH	CE	-0.48968	0.0242
		Azufre	-0.6443	0.0016
	Azufre intercambiable	Porosidad	0.58137	0.0057
	Fósforo	CE	0.45981	0.036
		Potasio intercambiable	0.83433	<.0001
		Magnesio intercambiable	-0.61396	0.0031
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.65362	0.0013
		Tensión 0.3 Bar	-0.63289	0.0021
	Relación Ca:Mg	Relación Ca:Mg foliar	0.53205	0.013
		Fósforo intercambiable	0.65362	0.0013
		Potasio intercambiable	0.50533	0.0195
		Tensión 0.3 Bar	-0.45094	0.0402

E. Anexo: Coeficientes de correlación del experimento 3; Contenedores bajo condiciones controladas

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
Crecimiento y productividad	Población de macollas	pH	0.62136	<.0001
	Altura de la yagua	pH	0.48874	0.0034
	Diámetro de la yagua	Azufre foliar	-0.4602	0.0062
		Calcio foliar	-0.48091	0.004
		pH	0.60445	0.0002
		Magnesio intercambiable	0.5175	0.0017
	Peso del tallo	Sodio intercambiable	0.47624	0.0044
		Magnesio foliar	-0.48394	0.0037
	Peso de la hoja	pH	0.69352	<.0001
		Magnesio foliar	-0.66312	<.0001
		pH	0.7777	<.0001
	Peso de la yagua	Azufre	-0.57942	0.0004
		Magnesio foliar	-0.53305	0.0014
		pH	0.65254	<.0001
		Fósforo intercambiable	0.42407	0.0624
	Peso de la raíz	Azufre	-0.52717	0.0016
		Azufre foliar	-0.58292	0.0004
		Magnesio foliar	-0.58213	0.0004
		pH	0.77603	<.0001
	Materia seca	Azufre	-0.6836	<.0001
Nitrógeno foliar		-0.44008	0.0104	
Azufre foliar		-0.52841	0.0016	
Magnesio foliar		-0.62442	0.0001	
	pH	0.79668	<.0001	

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
		Azufre	-0.6578	<.0001
Contenido de nutrientes en el tejido	Nitrógeno foliar	Materia seca	0.47199	0.0048
		Azufre foliar	0.43191	0.0107
		Calcio foliar	0.73905	<.0001
		Calcio foliar	Relación Ca:Mg foliar	0.70968
	Infiltración		0.59534	0.0003
	Potasio intercambiable		0.44166	0.0089
	Magnesio intercambiable		-0.48369	0.0038
	Sodio intercambiable		-0.54676	0.0008
	Densidad aparente		-0.44321	0.0098
	Magnesio foliar	Peso del tallo	-0.48394	0.0037
		Peso de la hoja	-0.66312	<.0001
		Peso de la yagua	-0.53305	0.0014
		Peso de la raíz	-0.58213	0.0004
		Materia seca	-0.62442	0.0001
		Nitrógeno foliar	0.73905	<.0001
	Relación Ca:Mg foliar	Calcio foliar	0.70968	<.0001
		Porosidad	0.56833	0.0006
		Infiltración	0.52119	0.0019
		Sodio intercambiable	-0.48868	0.0095
Propiedades físicas del suelo	Densidad aparente	Magnesio intercambiable	0.58725	0.0003
		Porosidad	-0.86668	<.0001
		Sodio intercambiable	0.60085	0.0002
		Saturación	-0.49521	0.0034
	Porosidad total	Relación Ca:Mg foliar	0.56833	0.0006
		Potasio intercambiable	0.45995	0.0071
		Magnesio intercambiable	-0.63919	<.0001
		Sodio intercambiable	-0.62034	0.0001
		Punto de saturación	0.44575	0.0093
		Densidad aparente	-0.86668	<.0001
Infiltración	Calcio foliar	0.59534	0.0003	

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
		Relación Ca:Mg foliar	0.52119	0.0019
		Magnesio intercambiable	-0.44437	0.0196
		Sodio intercambiable	-0.45525	0.0078
	Sólidos suspendidos	Relación Ca:Mg en el suelo	-0.47718	0.011
	Punto de saturación	Porosidad	0.44575	0.0093
Propiedades químicas del suelo	Conductividad eléctrica	Calcio intercambiable	0.66084	<.0001
		Relación Ca:Mg en el suelo	0.69688	<.0001
	pH	Numero de macollas por contenedor	0.62136	<.0001
		Altura de la yagua	0.48874	0.0034
		Diámetro de la yagua	0.60445	0.0002
		Peso del tallo	0.69352	<.0001
		Peso de la hoja	0.7777	<.0001
		Peso de la yagua	0.65254	<.0001
		Peso de la raíz	0.77603	<.0001
		Materia seca	0.79668	<.0001
		Azufre foliar	-0.52962	0.0013
		Azufre	-0.65929	<.0001
		Calcio intercambiable	0.48702	0.0035
	Fósforo intercambiable	Peso de la yagua	0.42407	0.0624
		Azufre foliar	-0.48221	0.0268
	Azufre intercambiable	Peso de la hoja	-0.57942	0.0004
		Peso de la yagua	-0.52717	0.0016
		Peso de la raíz	-0.6836	<.0001
		Materia seca	-0.6578	<.0001
		Azufre foliar	0.49269	0.0038
		pH	-0.65929	<.0001

Grupo	Variable	Variable correlacionada	Coefficientes de correlación Pearson	Prob > r suponiendo H0: Rho=0
	Potasio intercambiable	Calcio foliar	0.44166	0.0089
		Porosidad	0.45995	0.0071
		CE	0.66084	<.0001
		pH	0.49702	0.0035
	Calcio intercambiable	Relación Ca:Mg en el suelo	0.94312	<.0001
		Diámetro de la yagua	0.5175	0.0017
		Calcio foliar	-0.48369	0.0038
		Infiltración	-0.44437	0.0196
		Sodio intercambiable	0.8845	<.0001
	Magnesio intercambiable	Densidad aparente	0.58725	0.0003
		Calcio foliar	-0.54676	0.0008
		Porosidad	-0.63919	<.0001
		Infiltración	-0.45525	0.0078
		Magnesio intercambiable	0.8845	<.0001
		Relación Ca:Mg en el suelo	-0.46864	0.0052
	Sodio intercambiable	Porosidad	-0.62034	0.0001
		Densidad aparente	0.60085	0.0002
	Relación Ca:Mg del suelo	Sólidos suspendidos	-0.47718	0.011
		CE	0.69688	<.0001
		Calcio intercambiable	0.94312	<.0001
Sodio intercambiable		-0.46864	0.0052	

F. Anexo: Costos fijos y variables de los tratamientos.

Tratamiento	Costos variables por ha (COP)		Costos fijos por ha (COP)		Costos totales por ha (COP)
Calcio1	Enmiendas	\$ 450,000.00	Predial	309,106	8,228,837
	Fertilización	\$ 1,721,576			
	Drenaje	\$ 689,969			
	Control arvenses	\$ 931,975			
	Labores mecánicas	\$ 121,896			
	Movimientos	\$ 210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	\$ 85,569			
	Resiembra	\$ 264,816			
	Riego	\$ 1,779,831			
	Otros insumos	\$ 463,659			
Total Variables	\$ 6,719,731	Total Fijos	1,509,106		
Calcio2	Enmiendas	\$ 900,000	Predial	309,106	8,678,837
	Fertilización	\$ 1,721,576			
	Drenaje	\$ 689,969			
	Control arvenses	\$ 931,975			
	Labores mecánicas	\$ 121,896			
	Movimientos	\$ 210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	\$ 85,569			
	Resiembra	\$ 264,816			
	Riego	\$ 1,779,831			
	Otros insumos	\$ 463,659			
Total Variables	\$ 7,169,731	Total Fijos	1,509,106		
Calcio3	Enmiendas	\$ 1,350,000	Predial	309,106	9,128,837
	Fertilización	\$ 1,721,576			
	Drenaje	\$ 689,969			
	Control arvenses	\$ 931,975			
	Labores mecánicas	\$ 121,896			
	Movimientos	\$ 210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	\$ 85,569			
	Resiembra	\$ 264,816			
	Riego	\$ 1,779,831			
	Otros insumos	\$ 463,659			

Tratamiento	Costos variables por ha (COP)		Costos fijos por ha (COP)		Costos totales por ha (COP)
	Total Variables	7,619,731	Total Fijos	1,509,106	
Testigo	Enmiendas	-	Predial	309,106	7,778,837
	Fertilización	1,721,576			
	Drenaje	689,969			
	Control arvenses	931,975			
	Labores mecánicas	21,896			
	Movimientos	210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	85,569			
	Resiembra	264,816			
	Riego	1,779,831			
	Otros insumos	463,659			
	Total Variables	6,269,731	Total Fijos	1,509,106	
Yeso1	Enmiendas	750,000	Predial	309,106	8,528,837
	Fertilización	1,721,576			
	Drenaje	689,969			
	Controles arvenses	931,975			
	Labores mecánicas	121,896			
	Movimientos	210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	85,569			
	Resiembra	264,816			
	Riego	1,779,831			
	Otros insumos	463,659			
	Total Variables	7,019,731	Total Fijos	1,509,106	
Yeso2	Enmiendas	1,500,000	Predial	309,106	9,278,837
	Fertilización	1,721,576			
	Drenaje	689,969			
	Controles arvenses	931,975			
	Labores mecánicas	121,896			
	Movimientos	210,440	APS	1,200,000	
	Encalle	85,569			
	Resiembra	264,816			
	Riego	1,779,831			
	Otros insumos	463,659			
	Total Variables	7,769,731	Total Fijos	1,509,106	
Yeso3	Enmiendas	2,250,000.00	Predial	309,106	10,028,837
	Fertilización	1,721,576			
	Drenaje	689,969			

Tratamiento	Costos variables por ha (COP)		Costos fijos por ha (COP)		Costos totales por ha (COP)
	Controles arvenses	931,975			
	Labores mecánicas	121,896			
	Movimientos	210,440			
	Encalle	85,569			
	Resiembra	264,816	APS	1,200,000	
	Riego	1,779,831			
	Otros insumos	463,659			
	Total Variables	8,519,731			
			Total Fijos	1,509,106	

Referencias

- Albuquerque, A. W. D., Sá, L. D. A., Rodrigues, W. A. R., Moura, A. B., & Oliveira Filho, M. D. S. (2016). Growth and yield of sugarcane as a function of phosphorus doses and forms of application. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 29-35. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p29-35>
- Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2-3), 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
- An, S., Mentler, A., Mayer, H., & Blum, W. E. H. (2010). Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 81(3), 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.04.002>
- Araujo, L., de Sousa, D. M. G., de Figueiredo, C. C., Rein, T. A., & de Souza Nunes, R. (2018). The residual effect of gypsum on subsoil conditioning, nutrition and productivity of sugarcane crops. *Australian Journal of Crop Science*, 12(8), 1313-1321.
- Araújo, L. G., Figueiredo, C. C. D., Sousa, D. M. G. D., Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brazil, Nunes, R. D. S., Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Embrapa Cerrados,

- Planaltina, DF, Brazil, Rein, T. A., & Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Brazil. (2016). Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the brazilian Cerrado. *Australian Journal of Crop Science*, 10(11), 1557-1563. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.11.PNE156>
- Arienzo, M., Christen, E. W., Jayawardane, N. S., & Quayle, W. C. (2012). The relative effects of sodium and potassium on soil hydraulic conductivity and implications for winery wastewater management. *Geoderma*, 173-174, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.012>
- Aristizábal, A. (2009). *Efecto de altas saturaciones de Mg+2 y Ca+2 en las propiedades físicas de un suelo del Valle del Cauca*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3322>
- Aristizábal Arboleda, A. (2009). *Efecto de altas saturaciones de Mg+2 y Ca+2 en las propiedades físicas de un suelo del Valle del Cauca. Trabajo de maestría. Universidad Nacional de Colombia*.
- Asocaña. (2022). *Informe anual 2021-2022*. <https://asocana.org/documentos/672022-B663EF18-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>
- Asocaña. (2023). *Informe anual 2022-2023*. <https://asocana.org/documentos/2762023-1BF3626D-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>
- Banco de la República de Colombia. (2024). *Serie histórica periodicidad mensual (TRM)*. <https://totoro.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&NQUser=publico&NQPassword>

=publico123&Action=prompt&path=%2Fshared%2FSeries%20Estad%C3%ADstic
as_T%2F1.%20Tasa%20de%20Cambio%20Peso%20Colombiano%2F1.1%20TR
M%20-
%20Disponible%20desde%20el%2027%20de%20noviembre%20de%201991%2F
1.1.12.TCM_Serie%20historica%20promedio%20mensual&Options=rdf

Bello, S. K., Alayafi, A. H., AL-Solaimani, S. G., & Abo-Elyousr, K. A. M. (2021). Mitigating Soil Salinity Stress with Gypsum and Bio-Organic Amendments: A Review.

Agronomy, 11(9), 1735. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091735>

Bennett, J. McL., Marchuk, A., & Marchuk, S. (2016). An alternative index to the exchangeable sodium percentage for an explanation of dispersion occurring in soils. *Soil Research*, 54(8), 949. <https://doi.org/10.1071/SR15281>

Bernal, A., & Hernández, A. (2017). *Influencia de diferentes sistemas de uso del suelo sobre su estructura. Cultivos Tropicales*, 38 (4), 50-57.

Brady, K. U., Kruckeberg, A. R., & Bradshaw Jr., H. D. (2005). Evolutionary Ecology of Plant Adaptation to Serpentine Soils. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36(1), 243-266.

<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105730>

Calero, L. S. (1992). Manual de métodos analíticos para el análisis de suelos y tejido foliar en caña de azúcar. *Cenicaña*.

Carvalho, J. M., Andreotti, M., Buzetti, S., & Carvalho, M. D. P. E. (2013). Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(1), 1-9. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000100001>

- Castro, H., & Gomez, M. (2013). *Rangos de niveles edáficos que correlacionan con las exigencias físico-nutricionales de diferentes cultivos comerciales. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo.*
- Cenicaña. (2022). *Tecnologías y conocimiento para el manejo de la variedad CC 05-430.* Programa de agronomía.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (1996). *Estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia. 4.*
- Chen, L., & Dick, W. (2011). Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. *Ohio State University Extension.*
- Clemente, P. R. A., Bezerra, B. K. L., Silva, V. S. G. D., Santos, J. C. M. D., & Endres, L. (2017). Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. *Pesquisa Agropecuária Tropical, 47(1)*, 110-117.
<https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742563>
- Combatt Cabellero, E. M., Palencia, G., & Marin, N. (2003). Clasificación de suelos sulfatados ácidos según azufre extraíble en los municipios del medio y bajo Sinú en Córdoba. *Temas Agrarios, 8(2)*, 22-29. <https://doi.org/10.21897/rta.v8i2.616>
- Crusciol, C. A. C., Foltran, R., Rossato, O. B., McCray, J. M., & Rossetto, R. (2014). Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 38(6)*, 1843-1854. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600019>
- Crusciol, C. A. C., Rossato, O. B., Foltran, R., Martello, J. M., & Nascimento, C. A. C. D. (2017). Soil Fertility, Sugarcane Yield Affected by Limestone, Silicate, and Gypsum Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 48(19)*, 2314-2323. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411507>

- DANE. (2024). *Índice de precios al consumidor (IPC)*.
<https://www.dane.gov.co/files/operaciones/IPC/cp-IPC-dic2023.pdf>
- Dang, A., Bennett, J. McL., Marchuk, A., Biggs, A., & Raine, S. R. (2018). Quantifying the aggregation-dispersion boundary condition in terms of saturated hydraulic conductivity reduction and the threshold electrolyte concentration. *Agricultural Water Management*, 203, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.005>
- Dang, A., Bennett, J. McL., Marchuk, A., Marchuk, S., Biggs, A. J. W., & Raine, S. R. (2018). Validating laboratory assessment of threshold electrolyte concentration for fields irrigated with marginal quality saline-sodic water. *Agricultural Water Management*, 205, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.037>
- Darab, K. (1994). Magnesium in salt-affected soils. *Agrokémia és talajtan*, 43(1-2), 133-158.
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11(3-4), 199-238. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5)
- Donaldson, R., Meyer, J., & Madera, R. (1990). Response to potassium by sugarcane grown on base saturated clay soils in the Eastern Transvaal lowland. *South African Sugar Technologists' Association*.
- El-Tilib, M. A., Elnasikh, M. H., & Elamin, E. A. (2004). Phosphorus and Potassium Fertilization Effects on Growth Attributes and Yield of Two Sugarcane Varieties Grown on Three Soil Series. *Journal of Plant Nutrition*, 27(4), 663-699.
<https://doi.org/10.1081/PLN-120030375>
- Fan, B., Ding, J., Fenton, O., Daly, K., Chen, S., Zhang, S., & Chen, Q. (2022). Investigation of differential levels of phosphorus fixation in dolomite and calcium carbonate amended red soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2), 740-749. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11405>

- Fassbender, H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Ilica.
- Ferro, D. A., Andreini, B. L., Lozano, L. A., Merani, V. H., Bongiorno, F. M., Larrieu, L., Millán, G. J., & Soracco, C. G. (2023). Predicción de la concentración de calcio soluble en suelos agrícolas de la provincia de Buenos Aires. *Ciencias Agronómicas*, 41, e031. <https://doi.org/10.35305/agro41.e031>
- Fisher, M. (2011). Amending soils with gypsum. *Crops & Soils Magazine*, 4-9.
- Gabioud, E. (2018). Regeneración de la estructura edáfica y su efecto sobre el ingreso del agua. Evaluación del agregado de enmiendas en Argiudoles bajo siembra directa. (*Doctoral dissertation, Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires*).
- García, A. (2013). Causa de la degradación de recursos naturales .Desertificación. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá. P.319-320*.
- García, M., & Medina, E. (2011). *Crecimiento y morfología radical en dos genotipos de caña de azúcar (Saccharum spp.) sometidos a salinización con sales simples o suplementadas con calcio*.
<https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26831>
- García, O. (2002). Estudios básicos sobre los suelos afectados por una alta saturación de magnesio intercambiable en el Valle del río Cauca. *Universidad Nacional de Colombia sede Palmira*.
- García-Ocampo, A. (2004). *Physical Properties of Magnesium Affected Soils in Colombia*.
- Goldberg, S. (1987). Effect of Saturating Cation, pH, and Aluminum and Iron Oxide on the Flocculation of Kaolinite and Montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 35(3), 220-227. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1987.0350308>

- Gomez, J. (1973). Efecto de la relación Ca a Mg invertida sobre el porcentaje de saturación y la conductividad hidráulica. Escuela Nacional de Agricultura. *Colegio de Posgraduados. Chapingo*.
- Gonçalo Filho, F., Da Silva Dias, N., Suddarth, S. R. P., Ferreira, J. F. S., Anderson, R. G., Dos Santos Fernandes, C., De Lira, R. B., Neto, M. F., & Cosme, C. R. (2019). Reclaiming Tropical Saline-Sodic Soils with Gypsum and Cow Manure. *Water*, 12(1), 57. <https://doi.org/10.3390/w12010057>
- González, A. (1990). *Guías de prácticas de la Maestría en Suelos y Aguas*.
- Igac. (2006). *Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Informe general. Cenicaña. Cali. 37 p. (2v,; CD-ROM) (Anexo II. Leyenda general del estudio detallado Igac-Cenicaña)*.
- Instituto Geográfico " Agustín Codazzi." (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. <https://www.igac.gov.co/es/catalogo/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos>
- Johnston, Birky, & Hilton. (2016). Phosphogypsum: Sustainable Management and Use. (*International Fertilizer Industry Association*, Paris, France (96 p).
- Keren, R. (1991). Specific Effect of Magnesium on Soil Erosion and Water Infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 55(3), 783-787. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500030025x>
- Kosenius, A.-K., & Ollikainen, M. (2019). Drivers of Participation in Gypsum Treatment of Fields as an Innovation for Water Protection. *Ecological Economics*, 157, 382-393. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.002>
- León Sarmiento, L. A., & Mantilla, G. (2018). Estudios en suelos del Valle del Cauca con relación Ca: Mg invertida, 2. Efecto de varias enmiendas en las propiedades

químicas y físicas de un suelo de Guayabito. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*.

<https://agris.fao.org/search/en/providers/122610/records/64745b5a96fdec8b71b6e0a9>

López, M. (2016). *Distribución espacial de las propiedades químicas de los suelos en el Distrito de Riego RUT*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57874>

M. Zeyada, A., A. Al-Gaadi, K., Tola, E., Madugundu, R., & A. Alameen, A. (2023).

Sentinel-2 Satellite Imagery Application to Monitor Soil Salinity and Calcium Carbonate Contents in Agricultural Fields. *Phyton*, 92(5), 1603-1620.

<https://doi.org/10.32604/phyton.2023.027267>

Madero, E., Malagón, & García. (2004). Una mirada al origen y las propiedades de los suelos magnésicos en el Valle del Cauca-Colombia. *Acta Agronómica*, 53(3), 1–21. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/95

Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., & Neshat, A. (2013).

Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*, 120, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.018>

Marchuk, A., & Rengasamy, P. (2011). Clay behaviour in suspension is related to the ionicity of clay–cation bonds. *Applied Clay Science*, 53(4), 754-759.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.019>

Marín-Pimentel, G.-E., Saa, G. R., & Flores, J. C. M. (2022). *Evaluation of physicochemical properties in agricultural soils from Valle del Cauca-Colombia with an emphasis on degradation* [Preprint]. In Review.

<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1984109/v1>

-
- McCray, J. M., & Ji, S. (2018). Sugarcane yield response to calcium silicate on Florida mineral soils. *Journal of Plant Nutrition*, 41(19), 2413-2424.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1510520>
- McCray, J. M., Rice, R. W., Ezenwa, I. V., & Baucum, L. (2006). *Sugarcane plant nutrient diagnosis. Florida Sugarcane Handbook. Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.*
- Melani, E., Guilino, F., Draghi, L. M., Jorajuría, D., Villarreal, R., Lozano, L., Soracco, C. G., & Palancar, T. (2021). Enyesado de suelos sódicos: Modificación de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 120(2), 079. <https://doi.org/10.24215/16699513e079>
- Mikkelsen, R. (2010). *Fuentes de Magnesio*. [http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/47833649504C3064852579A0006A1A38/\\$FILE/3.%20Fuentes%20de%20Magnesio.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/47833649504C3064852579A0006A1A38/$FILE/3.%20Fuentes%20de%20Magnesio.pdf)
- Minato, E. A., Brignoli, F. M., Neto, M. E., Besen, M. R., Cassim, B. M. A. R., Lima, R. S., Tormena, C. A., Inoue, T. T., & Batista, M. A. (2023). Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. *Soil and Tillage Research*, 234, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105860>
- Morelli, S., Dalben, J., Almeida, & Demattê. (1992). Lime and phosphogypsum effects on the productivity of sugarcane and on the chemical properties of a medium texture latosol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 16:187–94.
- Moret-Fernández, D., Castañeda, C., Paracuellos, E., Jiménez, S., & Herrero, J. (2013). Hydro-physical characterization of contrasting soils in a semiarid zone of the Ebro

- river valley (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 486, 403-411.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.009>
- Moret-Fernández, D., & Herrero, J. (2015). Effect of gypsum content on soil water retention. *Journal of Hydrology*, 528, 122-126.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.030>
- Muñoz, F. (2018). Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 01-1940. *Serie Técnica*, (40).
- Nasser, M., Cardoso, All, & Correa. (2020). Sulfur doses, organic compost and gypsum in macronutrients contents of collard greens leaves. *Comunicata Scientiae*, 11, e3352. <https://doi.org/10.14295/cs.v11i.3352>
- Ollikainen, M., Kosenius, A.-K., Punttila, E., Ala-Harja, V., Ekholm, P., Ollikainen, M., Kosenius, A.-K., Punttila, E., Ala-Harja, V., & Ekholm, P. (2019). *Gypsum Amendment of Arable Fields – Introducing a Socially, Economically and Environmentally Sustainable National Measure in the EU CAP Support Scheme*.
<https://doi.org/10.22004/AG.ECON.289698>
- Orellana, J., & Pilatti, M. (1990). Aplicación de enmiendas cálcicas en un horizonte B2t. *Ciencia del Suelo*, 8(2), 127-139.
- Oster, J., Sposito, G., & Smith, C. (2016). Accounting for potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. *California Agriculture*, 70(2), 71-76.
- Pang, Z., Tayyab, M., Kong, C., Hu, C., Zhu, Z., Wei, X., & Yuan, Z. (2019). Liming Positively Modulates Microbial Community Composition and Function of Sugarcane Fields. *Agronomy*, 9(12), 808.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9120808>
- Pereira Da Silva, G., & Justino Chiaia, H. L. (2021). Limitation Due to Nutritional Deficiency and Excess in Sugarcane Using the Integral Diagnosis and

- Recommendation System (DRIS) and Nutritional Composition Diagnosis (CND). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(12), 1458-1467.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885690>
- Perez, O., Hernández, F., & Sandoval, F. (2003). Respuesta del cultivo de caña de azúcar a la aplicación de azufre con nitrógeno y potasio en tres suelos. *engicaña*, 121.
- Pita, M. F. (2017). *Propiedades físicas de suelos sódicos, su impacto en el crecimiento y absorción radical en el cultivo de maíz (Zea mays L.)*.
- Podwojewski, P. (1995). The occurrence and interpretation of carbonate and sulfate minerals in a sequence of Vertisols in New Caledonia. *Geoderma*, 65(3-4), 223-248. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00046-D](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00046-D)
- Qadir M & De Pauw. (2007). Emerging challenges addressing the characterization and mapping of salt-induced land degradation. *Presented at the first expert consultation meeting of the global network on salinization prevention and productive use of salt-affected habitats (SPUSH), 26–29 November 2007, Dubai, United Arab Emirates*.
- Qadir, M., Schubert, S., Oster, J. D., Sposito, G., Minhas, P. S., Cheraghi, S. A. M., Murtaza, G., Mirzabaev, A., & Saqib, M. (2018). High-magnesium waters and soils: Emerging environmental and food security constraints. *Science of The Total Environment*, 642, 1108-1117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.090>
- Qadir, M., Sposito, G., Smith, C. J., & Oster, J. D. (2021). Reassessing irrigation water quality guidelines for sodicity hazard. *Agricultural Water Management*, 255, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107054>
- Qadir, M., Vyshpolsky, F., Mukhamedjanov, K., Bekbaev, U., Ibatullin, S., Yuldashev, T., Noble, A. D., Karimov, A., Mirzabaev, A., & Aw-Hassan, A. (2014). Enhancing the

- Productivity of High-Magnesium Soil and Water Resources in Central Asia. En L. Mueller, A. Saporov, & G. Lischeid (Eds.), *Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia* (pp. 465-474). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_28
- Quintero, R. (1993). Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar. *CENICAÑA*, 6-11.
- Quirk, J. P., & Schofield, R. K. (1955). THE EFFECT OF ELECTROLYTE CONCENTRATION ON SOIL PERMEABILITY. *Journal of Soil Science*, 6(2), 163-178. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00841.x>
- Ramírez, J. A. (2011). *Evaluación general de la salinidad y modelación de los riesgos de salinización en suelos del Valle del Cauca: Uso práctico del modelo PLA para evaluar el riesgo de salinización en tierras bajo riego en la parte plana del Valle del Cauca (Colombia)*.
- Rengasamy, P. (2018). Irrigation Water Quality and Soil Structural Stability: A Perspective with Some New Insights. *Agronomy*, 8(5), 72. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050072>
- Rengasamy, P., & Olsson, K. (1991). Sodicity and soil structure. *Soil Research*, 29(6), 935. <https://doi.org/10.1071/SR9910935>
- Rhodes, R., Miles, N., & Hughes, J. C. (2018). Corrigendum to 'Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa' [Field Crops Research 223 (2018) 1–11]. *Field Crops Research*, 225, 180. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.004>
- Rodrigues, M., Nanni, M. R., Posser Silveira, C. A., & Da Silva Gualberto, A. A. (2021). Mining coproducts as alternative sources of nutrients for the cultivation of

- sugarcane (*Saccharum officinarum*). *Journal of Cleaner Production*, 291, 125925.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125925>
- Rossato, O. B., Foltran, R., Crusciol, C. A. C., Martello, J. M., Rossetto, R., & McCray, J. M. (2017). Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lime and gypsum in southeastern Brazil. *Bioscience Journal*, 276-287. <https://doi.org/10.14393/BJ-v33n2-32755>
- Safar, F., & Whalen, J. K. (2023). Mechanical stability of newly-formed soil macroaggregates influenced by calcium concentration and the calcium counter-anion. *Geoderma*, 430, 116333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116333>
- Santaella Gutiérrez, G., & González, A. (1965). Influencia del carbonato de calcio en las propiedades químicas de un suelo de la terraza de Villa-Rica (Cauca). *Acta Agronómica*.
https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48927
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. (2020). *ATLAS GEOQUÍMICO DE COLOMBIA MAGNESIO (MgO)*.
https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/20.Mgo.pdf
- Smith, C. J., Oster, J. D., & Sposito, G. (2015). Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. *Agricultural Water Management*, 157, 59-64.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.003>
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35.
<https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>

- Trujillo, A. T., García, Á., Amézquita, E., Chalarca, C. A. E., & Noguera, T. J. S. (2004). *Cambios volumétricos en suelos magnésicos del valle del río Cauca-Colombia. Ingeniería y Región*. file:///C:/Users/JSMARTINEZ/Downloads/Dialnet-CambiosVolumetricosEnSuelosMagnesicosDelValleDelRi-5432305%20(2).pdf
- Turan, M., Taban, S., Katkat, A., & Kucukyumuk, K. (2013). The evaluation of the elemental sulfur and gypsum effect on soil pH, EC, SO. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(1), 572-575.
- Ueckert, M., Wismeth, C., & Baumann, T. (2020). Crystallization of calcium carbonate in a large-scale push–pull heat storage test in the Upper Jurassic carbonate aquifer. *Geothermal Energy*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-0160-5>
- Vázquez, M. E. (Ed.). (2017). *Manejo y conservación de suelos: Con especial énfasis en situaciones argentinas*. AACs, Asociación Argentina Ciencia del Suelo ; FCAyF, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata : INTA.
- Volke Haller, V., & C. D. P. M. (1982). *Optimización de insumos de la producción en la agricultura*.
- Vyshpolsky, F., Qadir, M., Karimov, A., Mukhamedjanov, K., Bekbaev, U., Paroda, R., Aw-Hassan, A., & Karajeh, F. (2008). Enhancing the productivity of high-magnesium soil and water resources in Central Asia through the application of phosphogypsum. *Land Degradation & Development*, 19(1), 45-56. <https://doi.org/10.1002/ldr.814>
- Wei, X., Hao, M., Shao, M., & Gale, W. J. (2006). Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil and Tillage Research*, 91(1-2), 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.009>

-
- Wiedenfeld, B. (2011). SULFUR APPLICATION EFFECTS ON SOIL PROPERTIES IN A CALCAREOUS SOIL AND ON SUGARCANE GROWTH AND YIELD. *Journal of Plant Nutrition*, 34(7), 1003-1013. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555582>
- World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. (2022). FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- Ye, R., Wright, A. L., & McCray, J. M. (2011). SEASONAL CHANGES IN NUTRIENT AVAILABILITY FOR SULFUR-AMENDED EVERGLADES SOILS UNDER SUGARCANE. *Journal of Plant Nutrition*, 34(14), 2095-2113. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.618571>
- Zade, Swati & Chandran, P. & Pal, Dilip. (2017). *Role of Calcium Carbonate and Palygorskite in Enriching Exchangeable Magnesium to Impair Drainage of Vertisols of Semi-Arid Western India*.
- Zadorova, T., Jakšík, O., Kodešová, R., & Penížek, V. (2011). *Influence of terrain attributes and soil properties on soil aggregate stability*. *Soil Water Research*. <http://81.0.228.28/publicFiles/47157.pdf>
- Zhang, X. C., & Norton, L. D. (2002). Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *Journal of Hydrology*, 260(1-4), 194-205. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00612-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00612-6)
- Zhu, Y., Ali, A., Dang, A., Wandel, A. P., & Bennett, J. M. (2019). Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils. *Geoderma*, 352, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.041>

