

Evaluación de dosis y fuentes de enmiendas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de plantas de banano *in vitro* en condiciones de vivero

Melina Solano Vílchez

Tesis presentada a la Facultad de
Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica como
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería
Agronómica con énfasis en Fitotecnia

Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agroalimentarias
Universidad de Costa Rica
2013

Evaluación de dosis y fuentes de enmiendas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de plantas de banano *in vitro* en condiciones de vivero

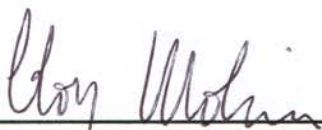
Melina Solano Vílchez

TESIS DE GRADUACIÓN PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA CON ÉNFASIS EN FITOTECNIA



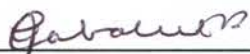
Dr. Erick Guevara Berger

DIRECTOR DE ESCUELA



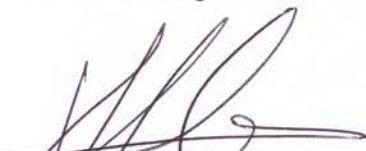
M.Sc. Eloy Molina Rojas

DIRECTOR DE TESIS



M.Sc. Gilberto Cabalceta Aguilar

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



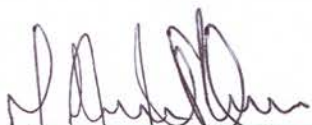
Dr. Rafael E. Salas Camacho

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



M.Sc. Hernán Sancho Vargas

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Melina Solano Vílchez

SUSTENTANTE

2013

DEDICATORIA

A Dios, por la fortaleza brindada en todo momento
A mi esposo por su amor, comprensión e incondicional apoyo
A mi familia por el apoyo y la motivación a lo largo de este proceso

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas a Dios por permitirme culminar esta etapa de preparación profesional.

A mi madre, a mi hermana, a mi madrina y a mi abuelita por sus oraciones, esfuerzo, apoyo, consejería y la motivación que me brindaron durante este arduo camino hacia la superación personal y profesional.

A mi amado esposo por su amor, comprensión, paciencia e incondicional apoyo y dedicación en todo este proceso.

A mi director de tesis M. Sc. Eloy Molina por su gran colaboración, guía y compromiso con este proyecto.

A los miembros del tribunal, Dr. Erick Guevara Berger, M.Sc. Gilberto Cabalceta, Dr. Rafael Salas y M.Sc. Hernán Sancho Vargas, por sus consejos y su valiosa colaboración en la revisión de este trabajo.

A CHIQUITA BRANDS INT, mediante la Dirección de Investigaciones Agrícolas C.T.O, por el financiamiento de este trabajo de investigación.

A mis preciados compañeros y amigos, Ramón Rojas Hernández, Rene Zúñiga Zúñiga, Dennis Fernández Duarte y demás personal del Centro de Investigaciones San Luis de CHIQUITA BRANDS INT, por su esfuerzo, dedicación y colaboración, ya que con su empeño la realización de este trabajo fue sumamente amena y satisfactoria.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 ACIDEZ DEL SUELO	4
2.2 SUELOS PARA BANANO	6
2.3 ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS	8
2.3.1 <i>Alta caída pluviométrica</i>	8
2.3.2 <i>Materia orgánica</i>	9
2.3.3 <i>Fertilizantes nitrogenados de reacción ácida</i>	9
2.4 ENCALADO.....	10
2.4.1 <i>Pureza química</i>	11
2.4.2 <i>Tamaño de partícula</i>	12
2.4.3 <i>Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT)</i>	12
2.5 FUENTES DE ENMIENDAS.....	12
3. OBJETIVOS.....	17
4. MATERIALES Y METODOS	18
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1 EFECTO DE LAS ENMIENDAS EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS	25
5.2 EFECTO DE LAS ENMIENDAS EN LA FERTILIDAD DEL SUELO.	26
5.2.1 <i>pH</i>	27
5.2.2 <i>Acidez intercambiable y saturación de acidez</i>	32
5.2.3 <i>Acidez potencial y saturación de bases</i>	33
5.2.4 <i>Bases intercambiables</i>	35
5.2.5 <i>Fósforo</i>	38
5.2.6 <i>Micronutrientes</i>	39
5.3 EFECTO DE LAS ENMIENDAS EN EL CONTENIDO DE NUTRIENTES FOLIARES	40
5.3.1 <i>Macronutrientes</i>	40
5.3.2 <i>Micronutrientes</i>	45
5.4 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE ENMIENDA	47
6. CONCLUSIONES	49
7. LITERATURA CITADA.....	51
8. ANEXOS.....	56

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características químicas de enmiendas utilizadas.	19
Cuadro 2. Efecto de fuentes de enmienda en las variables biométricas de plantas de banano después de 12 semanas de crecimiento en condiciones de vivero.	25
Cuadro 3. Análisis químico del suelo antes de la aplicación de tratamientos.	27
Cuadro 4. Estimación de costos de los diferentes tratamientos de enmienda.....	48
Cuadro 5. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de pH, acidez intercambiable y materia orgánica del suelo 12 semanas después de la siembra.	59
Cuadro 6. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de macronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.	60
Cuadro 7. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de micronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.	62
Cuadro 8. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de macronutrientes en las plantas 12 semanas después de la siembra.....	63
Cuadro 9. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de micronutrientes en las plantas 12 semanas después de la siembra.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Método de aplicación de enmienda sólida al suelo. (a) Pesado de dosis. (b, c, d y e) Aplicación de dosis en 5 kg de suelo seco. (f) Incorporación de enmienda en el suelo. (g) Colocación de suelo en bolsa de siembra. (h, i) Siembra después de período de incubación.....	20
Figure 2. Método de aplicación de enmienda líquida al suelo. (a y b) Aspersión de enmienda en el suelo. (c) Absorción total y distribución de la enmienda en el suelo..	21
Figure 3. Ubicación y distribución aleatoria de las plantas en el vivero.	22
Figure 4. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el pH del suelo 12 semanas después de la siembra.	29
Figure 5. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la acidez intercambiable (a) y la saturación de acidez (b) 12 semanas después de la siembra.....	32
Figure 6. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la acidez potencial (a) y la saturación de bases (b) 12 semanas después de la siembra.....	34
Figure 7. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de Ca del suelo 12 semanas después de la siembra.	35
Figure 8. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de Mg del suelo 12 semanas después de la siembra.	37
Figure 9. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de K del suelo 12 semanas después de la siembra.	38
Figure 10. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de P del suelo 12 semanas después de la siembra.	39
Figure 11. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de micronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.	40
Figure 12. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de N en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	41
Figure 13. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de P en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	42
Figure 14. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de K en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	43
Figure 15. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en absorción de Ca en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	44
Figure 16. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de Mg en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	45
Figure 17. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de micronutrientes en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.....	46
Figure 18. Efecto de fuentes de enmienda en el ritmo de emisión foliar de plantas de banano bajo condiciones de vivero.	56
Figure 19. Efecto de fuentes de enmienda en la altura de plantas de banano bajo condiciones de vivero.	56
Figure 20. Efecto de fuentes de enmienda en la circunferencia del seudotallo de plantas de banano bajo condiciones de vivero.	57

Figure 21. Efecto de fuentes de enmienda en el peso seco de plantas de banano bajo condiciones de vivero.	57
Figure 22. Efecto de fuentes de enmienda en el área foliar de plantas de banano bajo condiciones de vivero.	58
Figure 23. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de S en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.	61

RESUMEN

Se evaluó el efecto de diferentes dosis y tipos de enmiendas en el crecimiento de plantas de banano provenientes de cultivo *in vitro* bajo condiciones de vivero, y en los parámetros de acidez y fertilidad de un suelo bananero. El ensayo se realizó en la Finca Experimental del CTO (Central Tropical Organization) de la compañía Bananera Atlántica Limitada (COBAL), ubicada en San Luis de Guácimo, Limón. Para la siembra se utilizó un suelo clasificado como Inceptisol de la zona de Sarapiquí, Heredia y plantas provenientes de cultivo de tejidos del clon "Gran Naine". Las enmiendas aplicadas fueron las siguientes: Cal líquida en dosis de 8, 12 y 16 l.ha⁻¹, CaCO₃ y CaCO₃ de malla 170, dolomita calcinada en dosis de 2, 4, 6 y 8 t.ha⁻¹, mezcla de dolomita + dolomita calcinada, mezcla de dolomita + yeso + óxidos de calcio y magnesio, silicato de Mg, y mezcla de roca fosfórica + silicato de magnesio en dosis de 2, 4, 6 t.ha⁻¹. Se utilizó un diseño irrestricto al Azar, con 27 tratamientos y 5 repeticiones para cada tratamiento. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos con relación a las variables biométricas. El CaCO₃ 170 y CaCO₃ a 8 t.ha⁻¹ presentaron el mayor efecto en el aumento del pH y reducción de la acidez. Las fuentes de carbonato de calcio elevaron en mayor medida los niveles de calcio en las dosis de 4, 6 y 8 t.ha⁻¹, mientras que los silicatos presentaron los menores contenidos. Los tratamientos con dolomita aumentaron los contenidos de magnesio en todas las dosis aplicadas. Con respecto al análisis químico en la planta, la cal líquida obtuvo los valores más altos de nitrógeno y un aumento en el contenido de calcio al incrementar las dosis. Con la aplicación de dolomitas se obtuvo una mayor acumulación de magnesio en las plantas al aumentar la dosis. En general, los contenidos de micronutrientes disminuyeron al aumentar los niveles de las enmiendas, sin embargo la mayoría no mostró diferencias significativas con respecto al testigo y a las demás fuentes.

1. INTRODUCCIÓN

La producción y exportación de banano en Costa Rica comenzó hace más de 130 años, y hoy en día constituye una de las principales fuentes de empleo agrícola del país. Según CORBANA (2011), la importancia de la industria bananera es particularmente marcada en la zona caribeña costarricense; cifras oficiales muestran que de cada 100 trabajadores de esa región económica, casi un 75% están ligados directa o indirectamente con la producción de banano.

El banano es una planta herbácea que se desarrolla en condiciones óptimas en las regiones tropicales húmedas y cálidas. Presenta un crecimiento continuo y rápido, pero ese vigor vegetativo sólo puede darse bajo condiciones ecológicas apropiadas (Aubert 1971). Los requerimientos de luz, temperatura, reserva de agua y un buen contenido de nutrimentos son determinantes en su desarrollo (Spedding 1979).

La planta de banano requiere de suelos porosos, profundos, con textura media o ligera. El hecho de encontrar un porcentaje mayor de raíces a grandes profundidades (1-2m) tiene su explicación en la buena aireación y porosidad del horizonte; estas condiciones son comunes en los suelos bananeros de los países latinoamericanos, los que presentan una notable vegetación que no poseen otras regiones bananeras del mundo (Lassoudiere y Pinnon 1971)

A pesar de que el cultivo del banano no es muy exigente en cuanto a la acidez o alcalinidad de los suelos, ya que se pueden producir bananos con pH que oscilan entre 4,5 y 8,0, los mejores bananos comerciales se producen bajo condiciones de pH 6 a 7,5, fuera de esos rangos pueden haber limitaciones en la absorción de algunos de los nutrimentos de la planta (Soto 1992).

La acidez del suelo es uno de los problemas más importantes en el cultivo del banano en Costa Rica (Serrano 2003), se origina por la presencia de iones como el aluminio e hidrógeno, que contribuyen a reducir el pH e incrementan el nivel de acidez intercambiable, afectando tanto las características químicas como biológicas del suelo, lo cual reduce el crecimiento del cultivo del banano, y causa la disminución de la disponibilidad de algunos nutrimentos como Ca, Mg, K y P; favoreciendo el aumento de elementos como el Al y el Mn a niveles tóxicos para las plantas (Rajj 1991, Espinosa y Molina 1999). Además afecta el crecimiento de las raíces del banano, disminuye la eficiencia de los fertilizantes aplicados, y reduce en forma indirecta la capacidad de la planta para absorber agua.

La mayoría de las fuentes de fertilizantes nitrogenados utilizados en banano (urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio) causan efecto residual ácido en el suelo (Tisdale et al. 1993). La fertilización intensiva del cultivo del banano y las altas dosis han contribuido a la acidificación del suelo a corto plazo, lo que obliga a los productores a diseñar estrategias de aplicación de enmiendas para el control de la acidez.

El control de la acidez del suelo mediante el uso de enmiendas disminuye el efecto tóxico de la acumulación de Al^{+3} intercambiable que afecta el crecimiento de las plantas de banano, y al mismo tiempo puede contribuir a mejorar la población de microorganismos benéficos, que ha sido deteriorada por la misma acidez. Un adecuado control de la acidez del suelo incrementa la productividad del cultivo, la calidad de la cosecha y disminuye la proliferación de plagas y enfermedades. Las acciones correctivas que disminuyan la acidificación del suelo por uso de la tierra pueden ayudar a mejorar el ambiente y la calidad del suelo.

El encalado es la práctica más eficiente y económica para reducir los problemas de acidez del suelo, y existe una gran cantidad de opciones de enmiendas en el mercado, tales como carbonatos de Ca y/o Mg, óxidos, hidróxidos, silicio, y diferentes mezclas

de estos materiales, sin embargo los materiales de encalado utilizados en el país, difieren a menudo en sus propiedades físicas y químicas, lo cual afecta el grado de eficiencia agronómica y la fertilidad del suelo cuando son utilizados como enmiendas (Carballo y Molina 1993).

Debido a la gran diversidad de tipos de enmiendas disponibles en el mercado, es necesario realizar estudios que evalúen la eficacia agronómica y el beneficio económico de distintos materiales de encalado en el cultivo de banano.

Este trabajo se justifica como una alternativa para generar conocimiento en la corrección de problemas de acidez en suelos bananeros, el cual es un tema que ha sido muy poco estudiado en nuestro país y es de gran importancia hoy en día, debido a que la intensa fertilización que recibe el cultivo genera una tasa de acidificación de los suelos constante y permanente.

Por otra parte, los experimentos a nivel de campo en el cultivo de banano, usualmente son costosos y de largo plazo, al ser éste un cultivo perenne con producción de fruta todo el año, por lo que es recomendable realizar estudios de enmiendas en condiciones de vivero, que permitan evaluar una cantidad apreciable de materiales en diferentes dosis, utilizando un espacio pequeño, en un tiempo relativamente corto, y a un costo más económico, permitiendo seleccionar los tratamientos más promisorios para establecer posteriormente un ensayo definitivo de campo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Acidez del suelo

La acidez intercambiable se ha identificado como una de las principales limitaciones para la obtención de productividades sostenibles en el trópico húmedo. Los principales efectos son pérdida de peso en la fruta y en la velocidad de crecimiento de las plantas, lo anterior debido principalmente a una menor absorción de agua y nutrimentos por parte de la planta, cuando el sistema radicular de ésta se encuentra creciendo en suelos con alta acidez intercambiable (Chiquita 2010). La acidez afecta negativamente las variables de rendimiento como son el índice de cajas/racimo (ratio) y el retorno (número de racimos/unidad de producción/año). Las fuentes tradicionales que se han utilizado de enmienda, se caracterizan por ser escasamente solubles y de muy lento movimiento a través del perfil, lo que impide que la acidez intercambiable sea neutralizada adecuadamente a través del perfil del suelo, ocasionada principalmente por la reacción ácida de los fertilizantes nitrogenados los cuales son sumamente solubles y móviles dentro del suelo. Lo anteriormente denota la necesidad de evaluar nuevas fuentes de mayor solubilidad y movimiento a través del perfil (Chiquita 2010).

La gran importancia de la acidez del suelo, expresada a través del valor de pH, radica en que puede reflejar la presencia de compuestos tóxicos (Mn, Al) para las raíces de las plantas y, sobre todo, en que regula la solubilidad y, por tanto, la disponibilidad o asimilación de los nutrimentos minerales, así como la capacidad del suelo para almacenarlos (Ansorena 1995).

El Al^{+3} en la solución del suelo es el principal responsable de la disminución en el rendimiento de las plantas en suelos ácidos debido a que afecta el desarrollo de las raíces (Zapata 2004). Altos niveles de saturación de Al^{+3} también inhiben la elongación de las raíces y su penetración en el suelo, y consecuentemente, reducen la

absorción de agua y nutrimentos, así como la capacidad de las raíces de llegar a éstos en el subsuelo (Sánchez y Salinas 1983). El Al^{+3} también obstaculiza la translocación de nutrimentos a la parte aérea, los cuales se manifiestan principalmente como deficiencias de P, Ca y Mg (Sánchez y Salinas 1983, Raji 1991).

Una buena parte de los suelos cultivados en regiones tropicales presentan algún grado de problemas de acidez, lo que caracteriza el principal factor de degradación química del suelo. En general, estos suelos tienen un pH bajo, la concentración de Al en niveles tóxicos ($>1 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$), presentan alta capacidad de adsorción de aniones, especialmente fosfatos (Goedert et al. 1997, Ernani et al. 1998, Bohnen 2000), lo que resulta en una menor absorción de nutrimentos y agua, debido al menor volumen de suelo explorado. La disponibilidad de nutrimentos está relacionada con el pH del suelo. En los suelos ácidos con pH bajo ($<5,5$), hay menos disponibilidad de Ca, Mg y P (Espinosa y Molina 1999). Tales restricciones perjudican el desarrollo normal de las plantas, afectando a su capacidad productiva. Entre los factores que causan la acidez en el suelo se destacan la descomposición de materiales orgánicos (disociación de protones de los grupos carboxílicos y fenólicos de materia orgánica y residuos de cultivo), la adición de fertilizantes nitrogenados amoniacales (urea, sulfato de amonio, etc.), la lixiviación de cationes como el Ca, el K y el Mg (Pöttker 2002, Wiethölter 2002), y el cultivo de la tierra, tanto manejados en un sistema convencional como la siembra directa (Salet 1999, Pöttker y Ben 1998, Amaral 2002 y Wiethölter 2002).

La acidez intercambiable es la suma de $\text{Al}^{+3} + \text{H}^{+}$ intercambiable adsorbidos por fuerzas electrostáticas en la superficie de los coloides minerales y orgánicos (Fassbender y Bornemisza 1987, Molina 1998). La acidez intercambiable se determina con una solución no tamponada de KCl, y en la mayoría de los suelos ácidos de zonas tropicales está formada principalmente por Al^{+3} intercambiable, siendo el H^{+} intercambiable una fracción muy pequeña de ésta (Bertsch 1995).

La acidez no intercambiable está representada por el H^+ ligado en enlaces covalentes en los coloides con carga variable. Este tipo de acidez no es intercambiable, por lo que no está ligada a las cargas negativas de las arcillas y coloides orgánicos (Zapata 2004). Esta acidez prácticamente no causa problema al crecimiento de los cultivos, sin embargo requiere mayor consumo de cal para reducirla y le confiere a los suelos gran parte de su capacidad tampón (Espinosa y Molina 1999). La acidez no intercambiable es más alta en suelos con mayor contenido de materia orgánica, debido a que los iones H^+ se encuentran adsorbidos a los grupos carboxílicos y fenólicos de la materia orgánica (Zapata 2004).

La acidez no intercambiable no puede medirse con la solución de KCl, debiendo utilizar otros procedimientos, como la solución de Acetato de Calcio a pH 7, que si es capaz de extraer H^+ en enlaces covalentes en la superficie de minerales de arcilla (Raij 1983). La acidez no intercambiable usualmente es una fracción mucho más alta que la acidez intercambiable extraída con KCl. La suma de ambas fracciones de acidez constituye la acidez potencial (Espinosa y Molina 1999).

2.2 Suelos para banano

El grado de acidez o alcalinidad de los suelos bananeros está dado por el origen geológico y grado de desarrollo de los mismos. Los suelos latosólicos, bien desarrollados de la Costa Atlántica de Costa Rica, se caracterizan por tener un pH ácido como consecuencia del estado de meteorización en que se encuentran. Tienen predominancia de arcillas caoliníticas 1:1 de carga variable dependiente de pH, de bajo poder de retención de cationes. Los suelos de cenizas volcánicas de Costa Rica se caracterizan por tener un pH ligeramente ácido, resultado del alto contenido de materia orgánica y la presencia de arcillas alofanas de alta capacidad de intercambio (Soto 1992).

La acidez de los suelos generalmente refleja un grado de meteorización y lixiviación avanzado cuando la precipitación pluvial es mayor a la evapotranspiración del ecosistema y no ocurran adiciones de sedimentos o partículas en suspensión (Baligar et al. 1998), como ocurre en los suelos de origen aluvial cercanos a la costa en la región Caribe de Costa Rica. El grado de acidificación de los suelos bananeros depende del manejo y la edad de la plantación, en forma general a mayor edad de la plantación los suelos presentan mayor acidez (Serrano 2003).

Los suelos cultivados de banano presentan diferentes características de fertilidad. La Zona Caribe del país se divide en dos grandes regiones geológicas (Dóndoli et al. 1968), de manera que los suelos de la zona Caribe Noroeste se desarrollan sobre coladas de lava, rocas piroclásticas, rocas andesíticas, lahares pequeños, basaltos, ignimbritas, cenizas del cuaternario y pocas rocas sedimentarias. Las áreas de la zona Caribe Sureste, tienen suelos derivados de partículas provenientes de depósitos marinos clásticos finos y localmente calizos. Lara (1970) y Jiménez (1972) utilizan el río Reventazón como límite geográfico entre las dos áreas, y Jiménez (1972) clasifica a los suelos de la zona Oeste como de baja fertilidad y los de la zona Este de alta fertilidad. Las dos principales zonas de producción de banano en las llanuras aluviales del Caribe son conformadas por cuencas hidrográficas de ríos que nacen en las cordilleras Volcánicas Central (los de la zona Oeste) y la de Talamanca (los de la Este). Los suelos del lado oeste del río Reventazón son de fertilidad media a baja, y con un nivel de acidez de medio alto debido a los bajos contenidos de Ca y Mg (Serrano 2005). Los suelos del lado este del río Reventazón son de alta fertilidad, con un pH casi neutro y contenidos elevados de Ca y Mg. Sin embargo, la fertilización nitrogenada intensiva, la pérdida de nutrientes absorbidos en la cosecha, y el alto nivel de lixiviación de estos suelos, han contribuido a elevar la acidificación en ambos tipos de suelos (López y Espinoza 2000, Serrano 2002).

2.3 Acidificación de los suelos

La acidez de los suelos tiene diferentes y variadas causas, algunas de origen natural y otras provocadas por el hombre a través del manejo. Entre las de origen natural están la alta caída de pluviométrica y los elevados contenidos de materia orgánica (Sánchez 1981, Bernier y Alfaro 2006).

Entre las causas provocadas por el hombre se encuentran, el manejo intensivo de la tierra, el uso de fertilizantes nitrogenados amoniacales, la deforestación y el agotamiento de la frontera agrícola, son factores que han incrementado el área de tierras de cultivo con problemas de acidez (Carballo y Molina 1993).

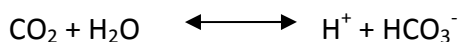
2.3.1 Alta caída pluviométrica

Las altas precipitaciones provocan la lixiviación o lavado de cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na) desde el suelo. El agua que pasa a través de los poros del suelo arrastra a los cationes de intercambio, especialmente los que se encuentran menos fuertemente ligados a la arcilla (K y Na), dejando lugar a cationes de mayor fuerza iónica como Al e H. Este movimiento de cationes a capas inferiores del suelo (lixiviación) contribuye a la acidificación debido a que por la presencia de aniones (iones de carga negativa) se forman pares iónicos, arrastrando los cationes con el movimiento del agua (Bernier y Alfaro 2006).

En un suelo con pH neutro la fase de intercambio con cationes básicos (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) está saturada y estos cationes satisfacen la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación se inicia con la pérdida de estos cationes debido en parte a la acción de las raíces. La planta al absorber cationes, libera H^+ para mantener el equilibrio en su interior, lo que contribuye a la reducción del pH del suelo (Espinosa y Molina 1999).

2.3.2 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo anhídrido carbónico (CO_2), que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO_3^-), de acuerdo con la siguiente reacción:



Esta reacción aporta H^+ que disminuye el pH del suelo, incrementando su acidez (Bernier y Alfaro 2006).

2.3.3 Fertilizantes nitrogenados de reacción ácida

El N que se encuentra en los fertilizantes puede estar como nitrato (NO_3^-), como amonio (NH_4^+) o como amida (NH_2), como en el caso de la urea, sin embargo las plantas absorben N preferentemente como nitrato, aunque también absorben amonio y en este último caso se produce la reacción de nitrificación que libera H^+ (Bernier y Alfaro 2006).

Los fertilizantes con nitratos producen una reacción alcalina en el suelo, es decir, aumentan el pH, resultando equivalente a una aplicación de carbonato de calcio, en cambio, los fertilizantes amoniacales o la urea producen una reacción ácida, que debería ser neutralizada por una cantidad determinada de carbonato de calcio (Bernier y Alfaro 2006). Según Espinosa y Molina (1999), el sulfato de amonio, la urea y el nitrato de amonio forman parte del grupo de fertilizantes nitrogenados que incrementan la acidez del suelo, siendo el sulfato de amonio el que presenta el mayor Índice de Acidez Fisiológica (Tisdale et al. 1993).

El cultivo del banano recibe entre 350 y 450 kg de N ha^{-1} para satisfacer las necesidades del cultivo, y la mayoría de ese N es aplicado utilizando fuentes

amoniacaes como la urea y el nitrato de amonio, que presentan un alto Índice de Acidez Fisiológica (Serrano 2005).

Por lo tanto, el grado de acidificación de los suelos cultivados con banano depende del manejo y/o la edad de la plantación, entre mayor edad mayor acidez. Un estudio del efecto de tres generaciones de cultivo de banano en la fertilidad del suelo (Serrano 2005) mostró que como consecuencia de la aplicación de fertilizantes y la lixiviación de las bases en el agua de drenaje, el pH disminuyó de 6,48 a 5,07 y la acidez intercambiable aumentó de 0,07 a 1,16 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$.

2.4 Encalado

El encalado consiste en la aplicación al suelo de sales básicas que neutralizan la acidez, como por ejemplo carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Los mecanismos de reacción de los materiales de encalado permiten la neutralización de los iones H^+ en la solución del suelo por medio de los iones OH^- producidos al entrar la cal en contacto con el agua del suelo (Espinosa y Molina 1999).

La adición de enmiendas con Ca se justifica debido a que este elemento cumple muchas funciones importantes en la planta y por esta razón se necesitan niveles relativamente altos de este nutrimento en el suelo para asegurar el crecimiento de las raíces. La absorción iónica de nutrimentos de la solución del suelo por las raíces depende de la presencia de Ca, que mantiene la integridad funcional de la membrana citoplasmática, lo que garantiza el proceso metabólico de absorción de nutrimentos (Espinosa y Molina 1999).

El resultado de neutralizar la acidez del suelo mediante el encalado o adición de cal es un aumento del pH y de la cantidad de Ca disponible en el suelo, y una reducción del porcentaje de Al en el complejo de cambio. Cuanto mayor sea la cantidad de arcilla y

humus del suelo, más cantidad de cal se necesitará para conseguir un determinado aumento de pH (Sánchez 1981, Ansorena 1995).

El encalado constituye la práctica más apropiada y económica para corregir los problemas de acidez (Inpofos 1997, Espinosa y Molina 1999). La respuesta favorable de los cultivos al encalado se da principalmente como resultado de la neutralización de la acidez causada por Al, H, Fe y/o Mn, y del suministro de Ca, Mg o ambos (Sánchez 1981, Kamprath 1984, Bertsch 1995).

Un material de encalado puede llevar el pH del suelo a niveles óptimos para la producción agrícola, si se utilizan adecuadamente. Los materiales de encalado también proporcionan Ca y/Mg al suelo y pueden ser absorbidos por las plantas (Carey et al. 2006).

Para evaluar la calidad de los materiales de encalado se utilizan parámetros tales como el Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT), el equivalente químico de carbonato de calcio (EQ), y la fineza o eficiencia granulométrica (EG) (Carey et al. 2006, Espinosa y Molina 1999, Molina 1998).

2.4.1 Pureza química

La capacidad de neutralizar la acidez del suelo depende de la composición química y de la pureza del material, ya que esta característica reconoce su composición química y los contaminantes presentes como arcillas, materia orgánica y otros minerales. Para determinar la pureza se utiliza el criterio del equivalente químico (EQ) que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular. El EQ se define como la capacidad del material para neutralizar la acidez comparado con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, al cual se le asigna un valor de 100% (Espinosa y Molina 1999).

2.4.2 Tamaño de partícula

El tamaño o fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción y a medida que se reduce el tamaño de la partícula de cualquier material de encalado se aumenta al área o superficie de contacto. Un m^3 de cal sólida sólo tiene 6 m^2 de superficie, pero esa misma cantidad molida y cernida en un tamiz de malla 100, tiene 60.000 m^2 de área superficial, es decir, entre más superficie específica tenga el material, más rápido reacciona la cal en el suelo (Espinosa y Molina 1999).

2.4.3 Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT)

El PRNT es un parámetro que se utiliza para valorar en forma conjunta la pureza química y la fineza de los materiales de encalado y se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide entre 100. Este valor indica el porcentaje de la cal, expresada por su equivalente químico (EQ), capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses (Barber 1984, Espinosa y Molina 1999).

2.5 Fuentes de enmiendas

En el mercado existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los materiales que se utilizan como alcalinizantes o correctivos de acidez se encuentran principalmente los carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de Ca y/o mg (Alcarde 1992) y debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una capacidad variable de neutralización (Chaves 1993).

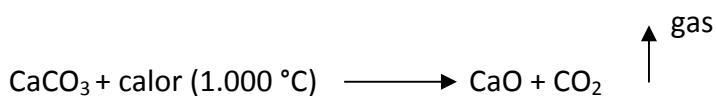
Las características de calidad de estos materiales son muy variables en todos los países de América Latina y algunas veces presentan diferencias importantes en el tamaño de partículas, algunos de ellas con valores inferiores a 60% de eficiencia granulométrica, debido a un deficiente proceso de molienda y falta de control de calidad. Esto ocurre

en casi todos los países donde todavía es posible encontrar canteras cuyo funcionamiento es muy artesanal (Espinosa y Molina 1999).

En Costa Rica, la principal fuente de encalado es el carbonato de calcio, debido a la abundancia natural de yacimientos de roca caliza y su bajo costo (Molina 1998). En otros países como Guatemala y Honduras, existen yacimientos de cal dolomita (carbonatos de Ca y Mg), material que es más conveniente como enmienda en suelos ácidos debido a su aporte de Mg, pero que resulta de mayor costo en nuestro país (Molina 1998).

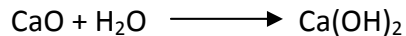
La cal agrícola o calcita contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO_3) y se obtiene al moler roca caliza o calcárea y luego se cierne en mallas de diferente tamaño. Las rocas calizas pueden contener impurezas como arcillas, hierro, arena y granos de limo que reducen el contenido del carbonato (Espinosa y Molina 1999). La calcita en su forma pura contiene 40% de Ca (Bernier y Alfaro 2006).

El óxido de calcio (CaO), conocido como cal viva o cal quemada, es un polvo blanco muy difícil de manejar por su efecto cáustico. Se fabrica calcinando la roca caliza, produciéndose la siguiente reacción (Bernier y Alfaro 2006):



El óxido de calcio reacciona rápidamente al ponerse en contacto con el agua provocando una fuerte reacción exotérmica que libera iones OH^- (Alcarde 1992, Espinosa y Molina 1999). Bernier y Alfaro (2006) recomiendan utilizarlos cuando se requieren efectos rápidos debido a su rápida reacción y mencionan que en su estado puro contiene 71% de Ca.

El hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ se conoce también como cal apagada o cal hidratada y se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua:



Es una sustancia blanca, polvorienta difícil y desagradable de manejar. Reacciona rápidamente en el suelo y debe ser incorporada (Bernier y Alfaro 2006).

La dolomita es un carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaCO}_3 \bullet \text{MgCO}_3$) y en su estado puro contiene 22% de Ca y 13% de Mg (Bernier y Alfaro 2006). Reacciona más lentamente que el CaCO_3 y tiene la ventaja que suministra Mg, el cual es un elemento que con frecuencia se encuentra deficiente en suelos ácidos (Molina 1998). La dolomita es útil en suelos ácidos que presentan deficiencias de Ca y Mg simultáneamente (Molina 1998).

A partir de la dolomita se obtienen óxidos de calcio y magnesio mediante calcinación de la piedra a 1000 °C, este producto se conoce como dolomita calcinada y es casi el doble de reactivo que la dolomita normal, llegando a alcanzar un PRNT hasta de 192%, como en el caso una dolomita calcinada de origen guatemalteco (Agromsa 2010).

La magnesita es un producto a base de carbonato de magnesio (MgCO_3), que en su forma pura posee 28,5% de Mg y es una excelente fuente de Mg (Espinosa y Molina 1999).

El óxido de magnesio (MgO) se obtiene de la calcinación de la magnesita a alta temperatura (Molina 1998), y es una enmienda que contiene solamente Mg en una concentración de 60% y su capacidad de neutralizar la acidez es mucho más elevada que la de otros materiales, pero debe ser molido finamente debido a su poca solubilidad en agua (Espinosa y Molina 1999).

Las arcillas calcáreas son depósitos no consolidados de CaCO_3 , conocidos también como margas, de textura arcillosa y con gran cantidad de impurezas. Por la general este material se maneja en húmedo lo que disminuye su eficiencia (Espinosa y Molina 1999).

Las fuentes de silicio también se utilizan como enmienda con bastante éxito (Alcarde 1992). Las escorias industriales son residuos de la industria del acero (escorias básicas) y la fundición del hierro (escorias Thomas). Ambas contienen silicatos de calcio (CaSiO_3) y silicatos de magnesio (MgSiO_3), que tienen acción neutralizante de la acidez del suelo a través del anión SiO_3^{-2} , que es una base débil y reacciona en el suelo en forma similar al CO_3^{-2} (Alcarde 1992).

El yeso agrícola o sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un producto natural que se encuentra en numerosos yacimientos en todo el mundo, la mayoría de ellos provenientes de rocas de evaporitas sedimentarias. El yeso también se obtiene como subproducto de los procesos industriales de producción de ácido fosfórico, en la fabricación de fertilizantes fosfatados como el superfosfato triple y los fosfatos amónicos. En este proceso la roca fosfórica es atacada con ácido sulfúrico obteniéndose ácido fosfórico y yeso. A pesar de su poca solubilidad en agua, el yeso puede reaccionar a mediano plazo en el suelo y constituir una fuente de Ca y S para los cultivos y su composición varía de 17 a 20% de Ca y de 14 a 18% de S (Espinosa y Molina 1999).

En el mercado se han desarrollado diferentes tipos de materiales que combinan dos o más enmiendas, es común encontrar mezclas de carbonatos con yeso, o de carbonatos con óxidos, etc.

La roca fosfórica también tiene efecto de enmienda, puede alcanzar hasta un 56% de Equivalente Químico de carbonato de calcio (Alcarde 1992), debido a su constitución química a base de fosfato tricálcico.

La cal es usualmente aplicada al suelo en forma de sólido, pero también puede ser aplicada en forma líquida como una suspensión. El carbonato de calcio y otras enmiendas molidas son muy poco solubles en agua. Con el uso de algunos coadyuvantes como las arcillas atapulgita y bentita, y un agente dispersante, es posible hacer suspensiones de cal en agua, en donde una parte del producto es agua y el resto es el material de enmienda y la arcilla (Barber 1984, Peters et al. 1996).

A pesar de que la aplicación de cal es una práctica común en muchas plantaciones de banano en Costa Rica, son muy pocos los estudios realizados para cuantificar su efecto. Solís y López (1994) encontraron respuesta a la aplicación de 1,2 t dolomita $\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ en un suelo ácido de la Zona Bananera Oeste de Costa Rica.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar el efecto de diferentes tipos y dosis de enmiendas en la fertilidad del suelo y en el crecimiento de plantas de banano provenientes de cultivo in vitro en condiciones de vivero.

3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de diferentes dosis y tipos de enmiendas en el crecimiento de plantas de banano provenientes de cultivo in vitro.
2. Determinar el efecto de estos tratamientos sobre los parámetros de acidez y fertilidad de un suelo bananero.
3. Comparar la eficiencia agronómica y el beneficio económico de varias enmiendas en el cultivo de banano bajo condiciones de vivero.

4. MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó en la Finca San Luis del Centro de Investigaciones del CTO (Central Tropical Organization) de la compañía Bananera Atlántica Limitada (COBAL), ubicada en San Luis de Guácimo, Limón, la cual se localiza a 82 msnm, y presenta una temperatura promedio de 27°C, con una precipitación anual promedio de 3.970 mm.

Se utilizó como material experimental plantas provenientes de cultivo de tejidos del clon "Gran Naine" con 6 cm de altura aproximadamente y cinco hojas emitidas, listas para iniciar la etapa de "endurecimiento". Se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 1000 kg de los primeros 10 cm de profundidad, en la banda de fertilización de varias plantas de banano, de trece años de edad, en un área seleccionada de la finca Cocobolo, Sarapiquí, y en la que previamente se identificó que presentaba problemas de acidez (pH 4,9 y acidez 3,55 cmol(+).l⁻¹). El área muestreada presentó plantas de banano de menor crecimiento y vigor, con un peso de racimo bajo. El suelo se desmenuzó manualmente y se secó al aire libre por un período de 2 semanas. Luego se pasó a través de un tamiz de 2 mm, y fue removido para obtener el mayor grado de homogeneidad posible en sus características químicas y físicas.

Además se realizó un análisis químico completo del suelo seleccionado para el estudio al momento del trasplante (semana 0), en el cual se determinó el pH en agua relación 1:2,5; y acidez intercambiable extraíble en KCl 1 M de acuerdo con lo propuesto por Díaz-Romeu y Hunter (1978); Ca, Mg, P, K, Fe, Cu, Zn, y Mn extraíble en Mehlich 3, utilizando las metodologías del Laboratorio de Suelos de CORBANA de acuerdo con Mehlich (1984), y materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934). El suelo clasificó preliminarmente como Typic Dystrudepts.

Las enmiendas utilizadas en los tratamientos fueron las siguientes: Carbonato de Calcio de Carbonatura, Carbonato de Calcio malla 170 de Sur Química, Dolomita calcinada de Agromsa, mezcla de 70% dolomita y 30% dolomita calcinada de Agromsa,

Supercal (mezcla de dolomita, yeso y óxidos de Ca y Mg) de Agromsa, Prosil (silicato de Mg) de Protech, Fostech (mezcla de roca fosfórica y silicato de Mg) de Protech, y Cal 56 (enmienda líquida de calcio) de Suplidora Verde.

Cuadro 1. Características químicas de enmiendas utilizadas.

ENMIENDA	N	Ca	Mg	P ₂ O ₅	S	SiO ₂ %	Equivalente	Eficiencia	PRNT
							Químico	Granul.	
Carbonato calcio Carbonatura		39,2	-	-	-	-	98	95	93
Carbonato calcio 170 Sur		39,2	-	-	-	-	98	100	98
Dolomita calcinada		40	22,2	-	-	-	192	99	192
Dolomita 70% + Dolomita Calcinada 30%		26,4	14,2	-	-	-	125	99	125
Supercal (dolomita + yeso + óxidos)		24,0	10,9	-	1,5	-	105	99	104
Fostech (roca fosfórica + silicato Mg)		21,4	6,0	22	2,0	26	78	90	70
Prosil (silicato Mg)		-	19,2	-	-	34,0	80	90	72
Cal 56 (líquido)	6,9	40,0	-	-	-	-	-	-	-

En el Cuadro 1 se presentan las características químicas de cada material. Todos los materiales son polvos finos, con excepción de la Cal 56 que es una enmienda líquida. El suelo se colocó en bolsas de plástico negro de 5 kg de capacidad (12" x 14"), y en cada bolsa se sembró una planta de banano, la cual constituyó la unidad experimental. Los tratamientos de enmiendas se aplicaron en cada bolsa o unidad experimental de la siguiente manera:

Testigo sin cal

CaCO₃ en dosis de 2, 4, 6 y 8 t.ha⁻¹

CaCO₃ 170 en dosis de 2, 4, 6 y 8 t.ha⁻¹

Dolomita calcinada en dosis de 2, 4 y 6 t.ha⁻¹

Mezcla 70% dolomita y 30% dolomita calcinada en dosis de 2, 4 y 6 t.ha⁻¹

La mezcla de dolomita + yeso + óxidos en dosis de 2, 4 y 6 t.ha⁻¹

El silicato de Mg en dosis de 2, 4 y 6 t.ha⁻¹

Roca fosfórica + silicato de Mg en dosis de 2, 4 y 6 t.ha⁻¹

Cal líquida en dosis de 8, 12 y 16 l.ha⁻¹

En total se aplicaron 27 tratamientos y 5 repeticiones para cada tratamiento, cada repetición corresponde a una bolsa de 5 kg de suelo con una planta sembrada.



Figure 1. Método de aplicación de enmienda sólida al suelo. (a) Pesado de dosis. (b, c, d y e) Aplicación de dosis en 5 kg de suelo seco. (f) Incorporación de enmienda en el suelo. (g) Colocación de suelo en bolsa de siembra. (h, i) Siembra después de período de incubación.

La cal fue aplicada al suelo seco en cada bolsa, se incorporó bien y luego se mantuvo las bolsas abiertas con humedad a capacidad de campo durante 1 mes, lo anterior se

realizó con todas las enmiendas (Figura 1), excepto con el tratamiento de Cal 56, ya que al ser una enmienda líquida fue aplicada sobre la superficie del suelo en forma de drench una semana antes de sembrar (Figura 2).

Posterior al período de incubación de un mes, se sembraron las plantas de banano provenientes de cultivo in vitro, que presentaran al menos 4 hojas emitidas antes de la etapa de endurecimiento de vivero. Las plantas se seleccionaron por peso, altura y número de hojas para garantizar que el material vegetal fuera lo más homogéneo posible.



Figure 2. Método de aplicación de enmienda líquida al suelo. (a y b) Aspersión de enmienda en el suelo. (c) Absorción total y distribución de la enmienda en el suelo.

Todos los tratamientos incluido el testigo, se fertilizaron al momento de la siembra con la fórmula 13.5-34.5-15 en dosis de 2 g.bolsa⁻¹. Posteriormente se aplicó el fertilizante Hidrocomplex (12-11-18-3), en dosis de 2,5 g.bolsa⁻¹ una vez al mes. Con este programa el aporte de nutrientes por planta fue de 0,87 g de N, 1,25 g de P₂O₅, 1,2 g de K₂O, 0,15 g de MgO, 0,4 g de S. Las plantas se colocaron en un área abierta cubierta con sarán negro de 50% de sombra (Figura 3), y recibieron agua de lluvia y/o de riego por aspersión cuando fue necesario. Las plantas se mantuvieron creciendo en las bolsas durante un período aproximado de 12 semanas después del trasplante.

Se realizó un análisis químico completo de suelos en todos los tratamientos al final del ensayo, es decir a las 12 semanas después de la siembra, mediante el procedimiento descrito anteriormente. Adicionalmente, a estas muestras se les determinó la acidez

no intercambiable extraíble en acetato de Ca de acuerdo con el procedimiento de Raij et al. (1987). Se calculó el % de saturación de bases utilizando la suma de bases + acidez no intercambiable, de acuerdo con la siguiente ecuación: (Raij 1991)

$$\% \text{ Saturación de bases} = \frac{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} \text{ (cmol(+).l}^{-1}\text{)}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Acidez no interc. (cmol(+).l}^{-1}\text{)}} \times 100$$



Figure 3. Ubicación y distribución aleatoria de las plantas en el vivero.

Al final del período se recolectaron las plantas de cada bolsa y se midió la altura, el área foliar, el peso fresco y seco de raíces, cormos,seudotallos y lámina foliar. Además las muestras de cada tejido se analizaron para determinar el contenido de P, K, Ca,

Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B, mediante digestión ácida en horno de microondas y determinación de contenido de nutrimentos en Espectrómetro de Plasma, y el N mediante el método de Dumas en analizador Automático N, de acuerdo al procedimiento del Laboratorio de Suelos y Foliar de CORBANA (Díaz-Romeu y Hunter 1978).

El diseño experimental utilizado fue Irrestricto al Azar, con 27 tratamientos y 5 repeticiones para cada tratamiento.

Las variables evaluadas se describen a continuación:

- Ritmo de emisión foliar: Al momento de establecer el experimento se marcó la última hoja emitida completamente abierta, y se tomó nota del estado de la hoja “candela”, a partir de ahí se contaron las hojas emitidas cada 2 semanas hasta la semana 12 después de la siembra.
- Altura de planta: la medida se tomó de la base del cormo hasta la “V” formada entre la última hoja completamente abierta y la hoja candela, cada 2 semanas hasta la semana 12 después de la siembra.
- Grosor del seudotallo: la medida se tomó con una cinta de costurera por encima del cormo y bordeando el seudotallo con la cinta cada 2 semanas hasta la semana 12 después de la siembra.
- Área Foliar (AF): se determinó a las 12 semanas del transplante, se consideraron las hojas completamente abiertas, las cuales fueron dibujadas en papel, se recortó el dibujo por el perímetro y se le determinó la masa del papel. El área se obtuvo al comparar la masa del dibujo de la hoja, contra la masa de un dibujo del mismo tipo de papel de área conocida (400 cm²).

- La producción de biomasa se determinó a las 12 semanas de inducidos los tratamientos, la planta se dividió en: lámina foliar, seudopetiole + nervadura, seudotallo, cormo y raíz. Dichas estructuras se secaron a 70°C hasta alcanzar masa constante.
- Contenido de nutrientes, pH, acidez intercambiable y saturación de acidez en el suelo.
- Absorción de nutrientes en cada tejido foliar.

Se realizó análisis de varianza “ANDEVA” para todas las variables, y la prueba de Tukey para separar las medias.

Se hizo un análisis del costo de la aplicación de las diferentes enmiendas. A partir de la dosis por hectárea, se calculó la dosis real de enmienda utilizando el criterio de encalar sólo la banda de fertilización. La banda corresponde al área de circunferencia que rodea la planta, y es el sitio donde se aplica la enmienda. Se calculó utilizando una circunferencia promedio de 1,2 m de diámetro por planta de banano, por lo que el área = $(0,6 \text{ m})^2 \times 3,14 = 1,13 \text{ m}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$. Debido a que sólo se encala la mitad de esa banda de fertilización, entonces $1,13/2 = 0,56 \text{ m}^2$. Una hectárea de banano tiene en promedio 1800 plantas, por lo que el área útil a encalar fue de $0,56 \text{ m}^2 \times 1800 = 1017 \text{ m}^2$, que corresponde aproximadamente al 10% de una hectárea. La dosis real de cal se calculó con base en la aplicación a la mitad de la banda de fertilización, y de esta forma se estimó el costo con base en el precio de mercado de cada enmienda.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Efecto de las enmiendas en el crecimiento de las plantas

Con respecto a la evaluación del crecimiento de las plantas de banano en el Cuadro 2 se presenta el análisis estadístico de las variables biométricas, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a ninguna de las variables evaluadas.

Cuadro 2. Efecto de fuentes de enmienda en las variables biométricas de plantas de banano después de 12 semanas de crecimiento en condiciones de vivero.

Tratamiento Fuente		dosis t.ha ⁻¹	peso seco planta (g)	altura planta (cm)	circunferencia pseudotallo (cm)	área foliar (cm ²)	# hojas emitidas	# hojas a cosecha	# hijos a cosecha	longitud raíz (cm)		
12 semanas después de la siembra												
1	CaCO ₃	2	29,3	21,8	8,5	1476	15,8	6,0	ab	2,2	ab	51,9
2	CaCO ₃	4	25,0	21,2	8,5	1352	16,3	6,2	ab	2,2	ab	47,6
3	CaCO ₃	6	23,7	20,8	8,2	1320	16,4	5,8	b	1,8	ab	44,8
4	CaCO ₃	8	21,4	20,6	8,0	1388	15,6	5,9	ab	0,6	b	38,4
5	CaCO ₃ 170	2	27,3	22,4	8,5	1540	16,1	6,0	ab	1,8	ab	47,4
6	CaCO ₃ 170	4	23,7	21,8	8,3	1388	16,6	6,1	ab	2,0	ab	54,2
7	CaCO ₃ 170	6	27,7	20,8	8,9	1412	16,9	6,1	ab	1,0	ab	49,0
8	CaCO ₃ 170	8	21,9	20,2	7,9	1344	16,4	6,1	ab	1,0	ab	48,2
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	25,3	22,6	8,3	1528	15,8	6,0	ab	2,0	ab	42,6
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	24,9	22,8	8,5	1596	16,1	6,1	ab	2,0	ab	59,4
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	26,4	21,2	8,4	1460	17,2	6,0	ab	2,4	a	53,4
12	dolomita calcinada	2	24,9	21,4	8,4	1580	16,2	6,1	ab	2,0	ab	52,4
13	dolomita calcinada	4	23,2	20,7	8,1	1324	15,8	6,1	ab	1,6	ab	47,8
14	dolomita calcinada	6	27,4	22,2	8,7	1398	16,9	6,3	ab	1,4	ab	56,6
15	dolom + dolom calcinada	2	26,4	22,2	8,5	1460	16,5	5,9	ab	2,2	ab	53,8
16	dolom + dolom calcinada	4	28,9	23,6	8,7	1672	17,0	6,0	ab	2,0	ab	63,8
17	dolom + dolom calcinada	6	28,3	21,4	8,9	1412	16,3	5,9	ab	2,2	ab	59,4
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	24,9	21,8	8,0	1376	16,0	5,7	b	2,2	ab	53,6
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	23,2	21,4	8,2	1504	16,4	5,8	b	2,2	ab	49,6
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	29,2	22,2	8,5	1512	16,0	5,7	b	1,8	ab	60,4
21	Silicato Mg	2	27,9	23,2	8,8	1528	17,3	5,5	b	1,8	ab	62,3
22	Silicato Mg	4	27,5	23,0	8,9	1624	16,8	6,0	b	1,6	ab	54,6
23	Silicato Mg	6	31,2	23,8	9,0	1432	17,4	5,5	b	2,4	a	53,6
24	Cal líquida	8*	26,1	23,2	8,4	1796	16,6	6,4	ab	1,4	ab	53,6
25	Cal líquida	12*	23,1	21,4	8,4	1696	16,5	7,2	ab	0,8	ab	47,0
26	Cal líquida	16*	24,9	23,0	8,6	1660	16,8	6,6	ab	1,0	ab	41,8
27	testigo	0	26,5	22,6	8,8	1533	16,7	6,0	a	2,0	ab	53,9
<i>Pr>F</i>			0,1645	0,433	0,220	0,255	0,387	0,030		0,001		0,659
<i>diferencia minima significativa test Tukey</i>			11,3540	3,9185	1,4261	602,390	2,5147	1,3995		1,7316		35,3850

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹

Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con p < 0,001.

La variable de peso seco probablemente es la más importante debido a que representa la acumulación total de biomasa seca de la planta.

Una posible explicación de la falta de respuesta a la aplicación de enmiendas en las variables de crecimiento pudo ser debida a que si bien el suelo presentó un pH muy ácido y un contenido de acidez intercambiable alto, su % de saturación fue ligeramente bajo y los contenidos de Ca y Mg (Cuadro 3) estaban en un rango adecuado para el banano (López y Espinosa 1995). Estas condiciones de fertilidad de suelos son muy comunes en los suelos bananeros de Costa Rica (Serrano 2005), donde la acidez se acumula en la banda de fertilización como producto de la acción residual de fertilizantes nitrogenados amoniacales, pero muchos de los suelos presentan contenidos adecuados de Ca y Mg y % de saturación de acidez baja (Serrano 2002).

La falta de respuesta en las variables de crecimiento podría explicarse también por la calidad de las plantas de banano in vitro que se desarrollan rápidamente, mostrando muy buen vigor y homogeneidad, con un buen crecimiento inicial de raíces. Probablemente también contribuyó a ese buen crecimiento, el efecto de las tres aplicaciones de fertilizantes que se hicieron.

Aunque la aplicación de enmiendas redujo la acidez intercambiable del suelo, aumentó el pH y subió los niveles disponibles de Ca y/o Mg (Espinosa y Molina 1999), probablemente el tiempo tan corto de evaluación del presente ensayo no fue suficiente para que se presentara un efecto favorable en el crecimiento de las plantas de banano.

5.2 Efecto de las enmiendas en la fertilidad del suelo.

El suelo utilizado en el presente estudio clasificó como Typic Dystrudepts, perteneciente al orden de Inceptisoles, que son suelos con características poco

acentuadas y escaso desarrollo pedogenético, en los que sus propiedades químicas y mineralógicas cambian según sea su origen (Bertsch 1995).

El análisis de suelo inicial mostró un pH fuertemente ácido, acidez intercambiable muy alta, con niveles medios de Ca y Mg, bajos de K, y adecuados de P (Cuadro 3). Con respecto a los micronutrientes, el Fe presentó un nivel muy alto, probablemente debido al pH muy ácido, y el Cu, Zn y Mn mostraron valores adecuados. La materia orgánica presentó un nivel bajo. De acuerdo con los criterios de diagnóstico de problemas de acidez de Molina (1998), este suelo se considera moderadamente ácido, debido a que sólo cumple dos de esos criterios, que son el pH muy ácido y la acidez intercambiable alta, pero la suma de bases y la saturación de acidez presentaron valores medios o bajos.

Cuadro 3. Análisis químico del suelo antes de la aplicación de tratamientos.

<i>Id. de la Muestra</i>	<i>pH</i>	<i>Acidez cmol(+).l⁻¹</i>	<i>S. A %</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg cmol(+).l⁻¹</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu mg.l⁻¹</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>M.O. %</i>
<i>Muestreo inicial</i>	4,87	3,55	24,6	8,21	2,34	0,34	42	317	13	4	15	1,96

5.2.1 pH

En la Figura 4 se observó un incremento general del pH al final del experimento con la aplicación de todas las enmiendas evaluadas, siendo el pH antes de iniciar el experimento de 4,87. Las fuentes y dosis que tuvieron un efecto mayor sobre el pH fueron CaCO₃ 170 (4, 6 y 8 t.ha⁻¹), Dolomita + dolomita calcinada (4 t.ha⁻¹) y el CaCO₃ (6 y 8 t.ha⁻¹), y la cal líquida 16 l.ha⁻¹, que aumentaron el pH en forma significativa con respecto al testigo. En el Cuadro 5 del anexo se observó que el CaCO₃ 170 mostró el mayor efecto en aumentar el pH del suelo, alcanzado los valores más altos con la dosis de 8 t.ha⁻¹, probablemente debido a su mayor grado de fineza al compararlo con las

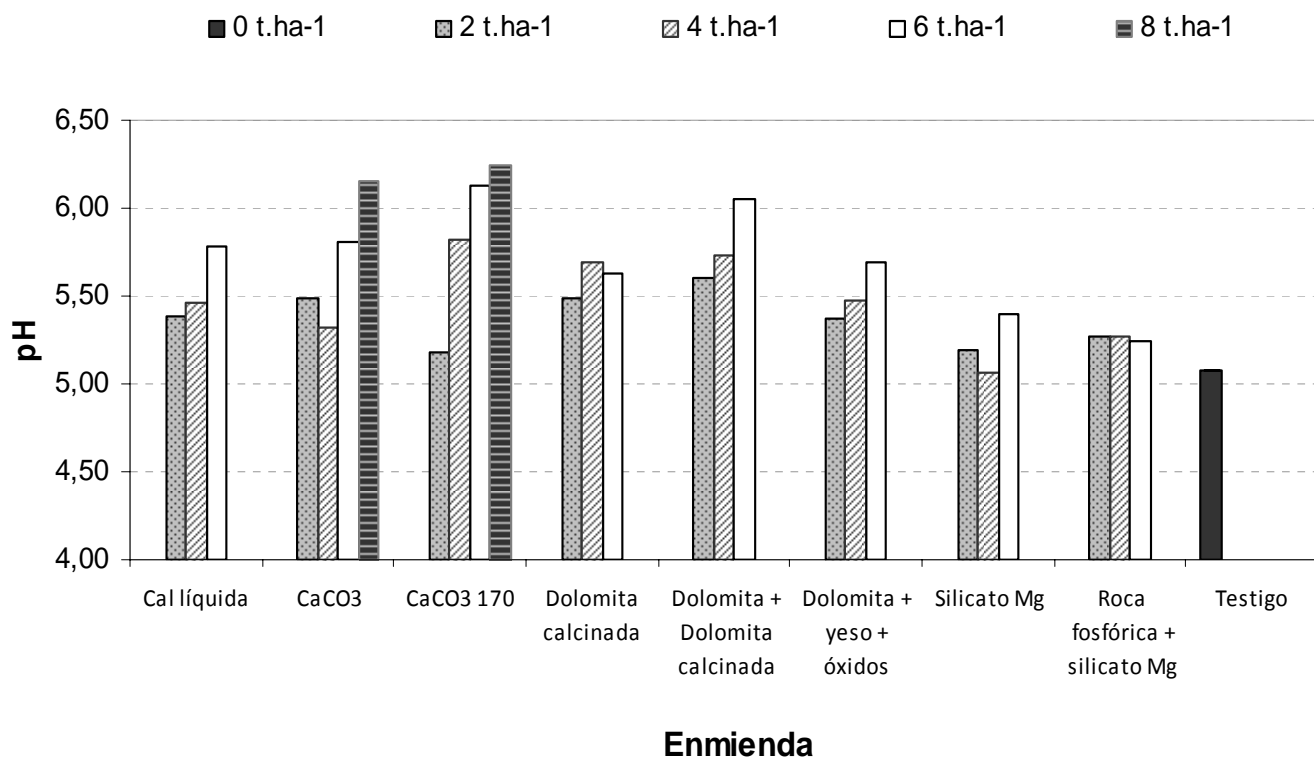
otras enmiendas. El CaCO_3 menos fino le siguió en efecto sobre el pH. Ambos carbonatos superaron a la dolomita en esta variable.

La mezcla de dolomita + dolomita calcinada superó al testigo en forma significativa (Cuadro 5 del Anexo) con las dosis más altas de 4 y 6 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, el mismo comportamiento presentó la enmienda líquida con la dosis más alta de 16 $\text{l}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Los tratamientos de la mezcla dolomita + óxidos + yeso, dolomita calcinada, la mezcla dolomita + dolomita calcinada en dosis de 2 y 4 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, roca fosfórica + silicato de Mg, silicato de Mg, y las dosis de 8 y 12 $\text{l}\cdot\text{ha}^{-1}$ de enmienda líquida, no presentaron diferencias significativas con respecto al testigo sin cal, aunque la mayoría de ellas subieron el pH del suelo.

Los tratamientos con menos efecto sobre el pH del suelo fueron la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg y el silicato de Mg, con valores por debajo de 5,4 y muy similares al testigo. Ambos materiales presentaron una granulometría ligeramente gruesa, inferior al valor reportado en su ficha técnica, además de que su Equivalente Químico es inferior al resto de enmiendas utilizadas (Cuadro 1), lo que explicaría su escaso efecto sobre el pH a corto plazo.

El mayor efecto de los dos carbonatos de Ca fue probablemente debido a su alta fineza, y el CaCO_3 170 fue superior debido a que el 80% del material pasa la malla 170 mesh, siendo más fino que el otro carbonato de Ca, y esto causó una reacción química más rápida para aumentar el pH del suelo (Molina 1998).



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 4. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el pH del suelo 12 semanas después de la siembra.

Alcarde (1992) y Raij (1991) confirman lo anterior, indicando que uno de los factores que afectan la eficiencia de neutralización del material de encalado es el tamaño de partículas. Las enmiendas finas reaccionan muy rápido y las partículas gruesas reaccionan más lentamente en el suelo.

Carey et al. (2006) indican que la velocidad de reacción de un material de encalado es determinada por los tamaños de partícula del material. Así, todas las partículas de cal que pasan por un tamiz de malla 100 van a reaccionar en el primer año mientras que de los materiales de encalado que pasan por un tamiz de malla 20, sólo el 60% va a reaccionar dentro de un año de aplicación y el material que no pasa el tamiz de malla 20 no se espera que reaccione en el siguiente año de aplicación. Tomando en cuenta

esto, en un periodo tan corto como el de la evaluación del ensayo (16 semanas entre períodos de incubación del suelo y vivero), solamente los materiales más finos pudieron tener una reacción rápida.

En la Figura 4 también se observa que el mayor incremento del pH se presentó a partir de la dosis de 6 t.ha^{-1} en el caso principalmente de los carbonatos de Ca y la mezcla dolomita + dolomita calcinada, o de 16 l.ha^{-1} para la enmienda líquida.

Entre las fuentes que contienen Ca y Mg solamente dolomita + dolomita calcinada en la dosis más alta de 6 t.ha^{-1} presentó diferencias significativas con el testigo. El tratamiento con enmienda líquida sólo presentó diferencia en la dosis más alta. Los tratamientos con silicato de Mg y la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg no presentaron diferencias significativas en el pH con respecto al testigo.

Las fuentes convencionales de Ca, como los carbonatos y las dolomitas promovieron en general un aumento en pH a dosis más altas, por lo que resulta lógico que a dosis de 8 t.ha^{-1} los carbonatos presentaran los mayores valores de aumento de todos los tratamientos. En un estudio realizado por la Universidad de Wisconsin se determinó que los materiales calcínicos reaccionan más rápidamente que los materiales dolomíticos en presencia de suelos ácidos (Peters et al. 1996). Lo anterior explica el comportamiento obtenido con los carbonatos, los cuales presentaron los mayores valores de pH con respecto a las demás enmiendas.

Los resultados obtenidos concuerdan con un estudio realizado en el cultivo de naranja Valencia en la zona Norte de Costa Rica (Molina y Rojas 2006), en el cual se determinó que al aumentar las dosis de dos enmiendas de carbonato de calcio y una de carbonato + MgO, causaron un incremento del pH y una disminución de la acidez, sin embargo, estos autores obtuvieron un aumento del pH del suelo menor debido a que

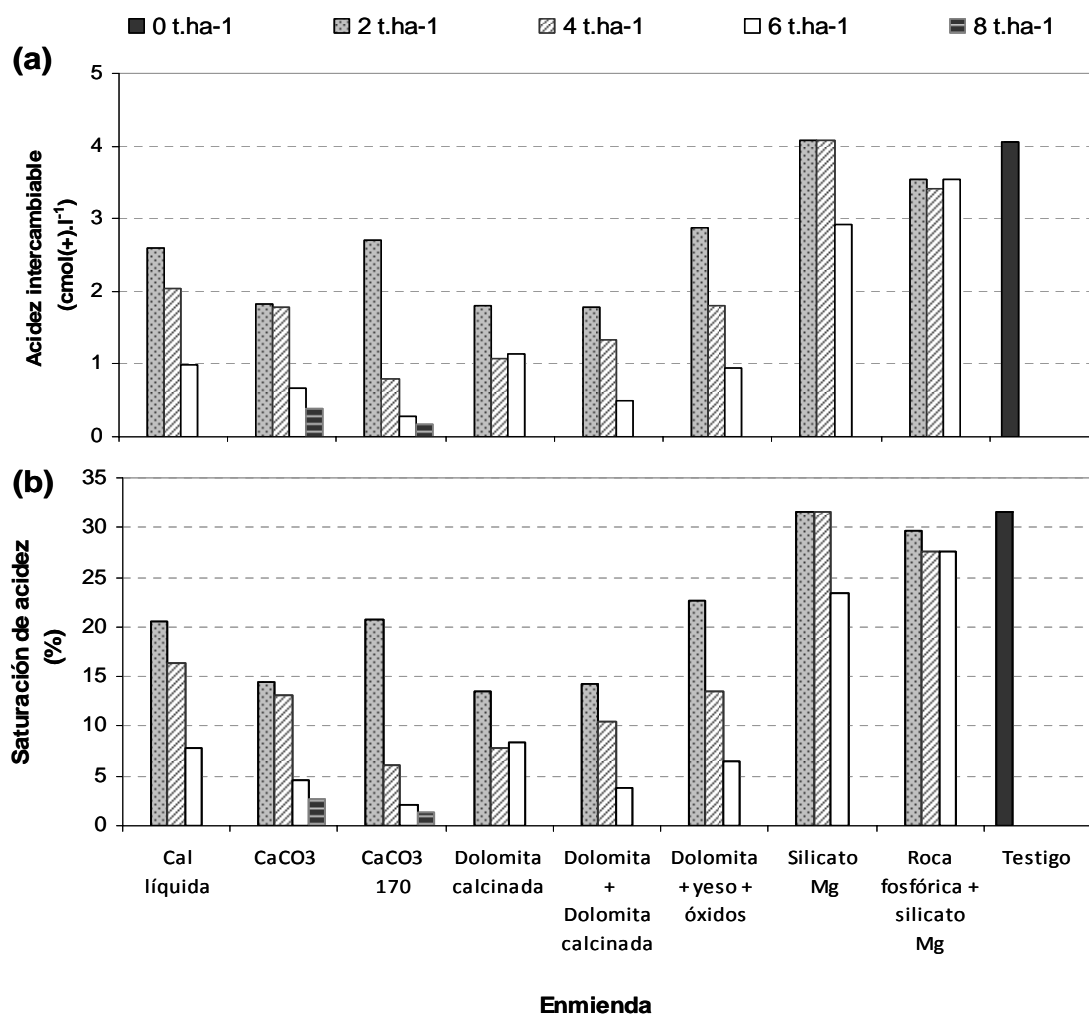
utilizaron dosis más bajas de enmienda (1, 2 y 3 t.ha⁻¹) y a que el suelo de esa zona presentaba mayores problemas de acidez.

Dentro de las fuentes no convencionales resalta la cal líquida, en la cual las cantidades aplicadas fueron en términos de enmienda al menos 200 veces más bajas que las otras fuentes, sin embargo el efecto sobre el pH fue similar, y con mayor grado que otras enmiendas como el silicato de Mg y la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg. Esto podría ser explicado por la alta fineza del material, debido a que la Cal 56 contiene 56% de CaO, en forma de carbonato de Ca micronizado (< 2 micras), de grado farmacéutico y el tamaño de sus partículas es de malla 625 mesh, penetrando más profundo que la cal en polvo y reaccionado muy rápido, además la goma Xanthana, que corresponde a unos de sus componentes, le permite una mayor persistencia y movilidad en el suelo, lo cual se refleja en su mayor disponibilidad y efecto más rápido de este producto (Suplidora Verde 2010).

Peters et al. (1996) sugirieron el uso de las suspensiones líquidas en situaciones donde se recomienda una distribución muy uniforme de cal o una reacción muy rápida de ésta y se utilizan volúmenes mucho más bajos que los de cal seca convencional, debido a que los materiales de encalado muy fino reaccionan rápidamente al mezclarse completamente en el suelo. También mencionan que las suspensiones líquidas de cal no se deben utilizar como sustituto de aplicaciones puntuales o de piedra caliza agrícola, pero sí para proporcionar un pequeño aumento en el pH del suelo en terrenos donde la aplicación de cal seca no puede justificarse, por ejemplo terrenos alquilados o aplicaciones previstas para contrarrestar la acidificación de los suelos debida a las aplicaciones de N en la producción sin labranza. El costo de la aplicación de cal líquida debe ser comparado con el de grandes volúmenes de cal en seco ya que la primera contiene una cantidad equivalente de material más fino comparado con los materiales más gruesos de la segunda los cuales proporcionan efectos residuales.

5.2.2 Acidez intercambiable y saturación de acidez

En la Figura 5 se observa el efecto de las enmiendas sobre la acidez intercambiable extraíble en KCl (Figura 5a) y sobre la saturación de acidez (Figura 5b) mostrando un efecto similar al aumentar la dosis de las enmiendas aplicadas, siendo CaCO_3 170, dolomita + dolomita calcinada y CaCO_3 , los tratamientos con mayor impacto en disminuir la acidez del suelo. La cal líquida y la mezcla de dolomita + yeso + óxidos mostraron igualmente un efecto descendente en estas variables al incrementar las dosis, pero éstas en menor grado que las fuentes mencionadas anteriormente.

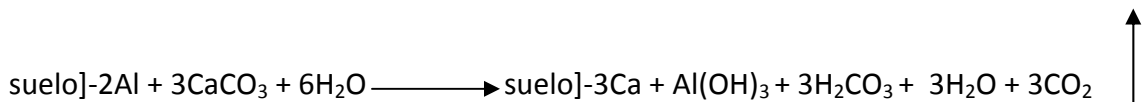


Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 5. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la acidez intercambiable (a) y la saturación de acidez (b) 12 semanas después de la siembra.

De manera similar al pH, la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg y el silicato de Mg mantuvieron valores altos, mayores de $2,9 \text{ cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$ en el caso de acidez intercambiable y de 25% en la saturación de acidez, por lo que no contribuyeron de manera importante a la disminución de esta variable.

Según Bertsch (1995), la aplicación de fuentes de CaCO_3 producen un efecto de neutralización de la acidez intercambiable, es decir, del Al (principalmente) y del H intercambiable, ya que el ácido carbónico se descompone en dióxido de carbono que se volatiliza y en agua, de la siguiente manera:



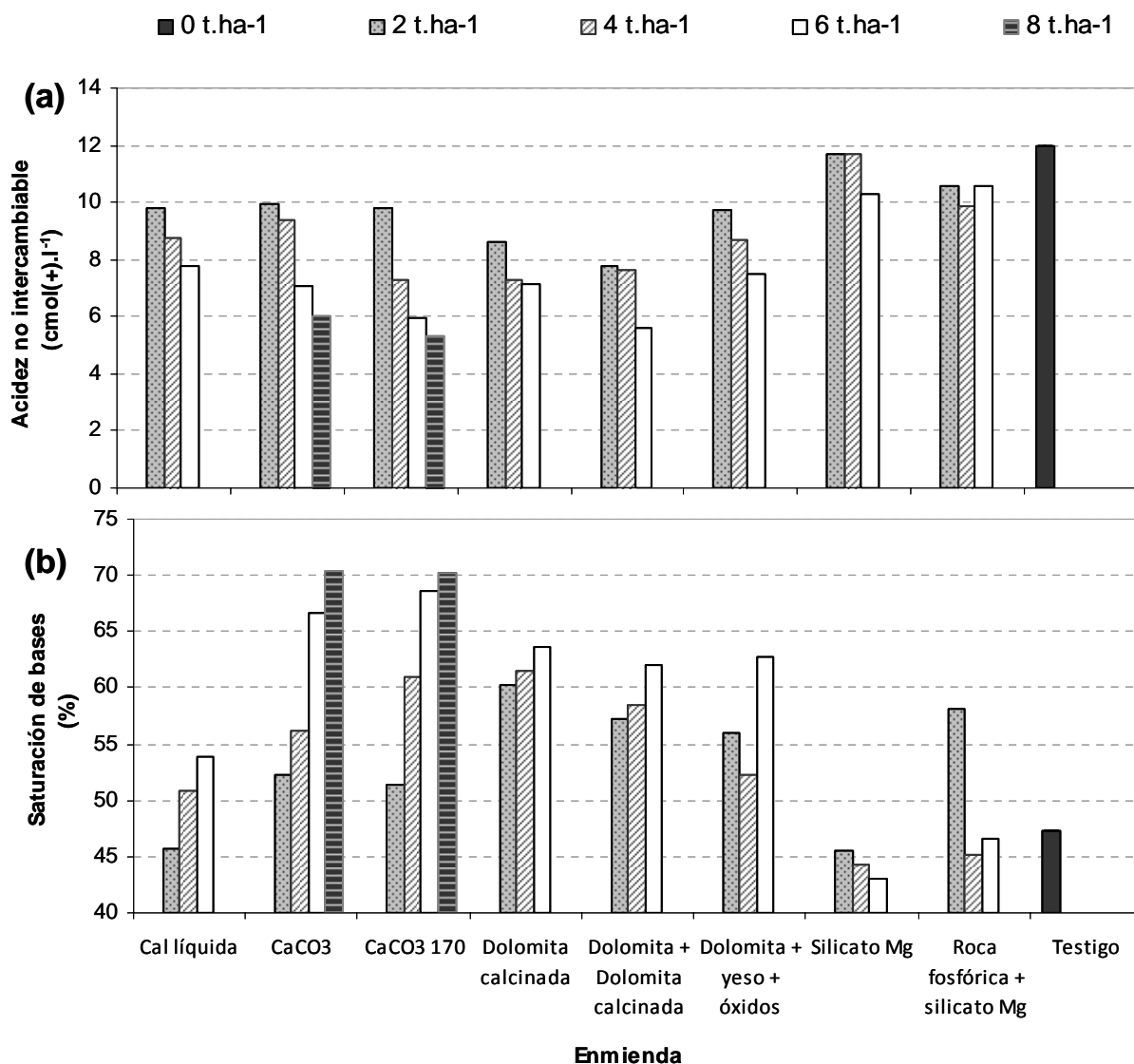
Cuando el pH alcanza niveles de 5,5, prácticamente se ha conseguido la neutralización total del Al intercambiable (Kamprath 1984, Molina 1998), porque para arriba de este valor el Al precipita como hidróxido insoluble. Lo anterior explica la disminución en los valores de acidez obtenidos, principalmente con los carbonatos.

5.2.3 Acidez potencial y saturación de bases

Al igual que la acidez intercambiable extraída con KCl, la acidez potencial extraída con acetato de calcio (Figura 6a) presentó la misma tendencia descrita anteriormente, donde CaCO_3 170, dolomita + dolomita calcinada y CaCO_3 fueron los tratamientos con valores menores de acidez potencial, y el silicato de Mg y la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg mostraron los valores más altos.

Se presentó un incremento en la saturación de bases (Figura 6b) al aumentar la dosis de cal, sobresaliendo de manera importante los carbonatos y las dolomitas. De acuerdo con Raij (1991), el valor de saturación de bases adecuado para el cultivo de banano debe ser de 70% cuando se utiliza el método de extracción de acidez no intercambiable con Acetato de calcio. En la Figura 6b se observa que a pesar de las

dosís aplicadas, la mayoría de las enmiendas no lograron alcanzar este valor, con excepción de CaCO_3 170 y CaCO_3 , en sus dosis más altas, lo cual significa que se requieren cantidades más altas de las demás enmiendas o permitir que pase más tiempo para que completen su reacción en el suelo.



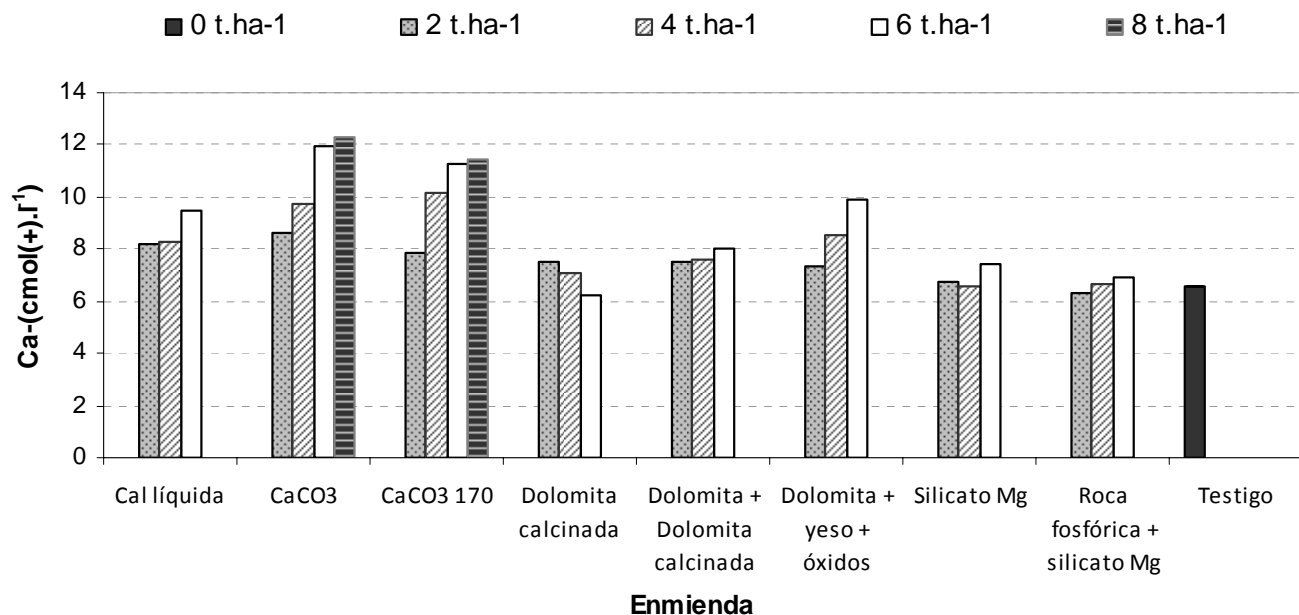
Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 6. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la acidez potencial (a) y la saturación de bases (b) 12 semanas después de la siembra.

5.2.4 Bases intercambiables

Las enmiendas que presentaron un mayor aumento en el contenido de Ca en el suelo fueron CaCO_3 y CaCO_3 170, mientras que la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg y el silicato de Mg fueron los tratamientos con el menor contenido debido a la ausencia de Ca en el silicato (Figura 7).

A pesar de que la concentración de Ca es similar en la dolomita calcinada, cal líquida, CaCO_3 y CaCO_3 170, sólo las tres últimas aumentaron el contenido de este nutrimento a nivel de suelo. Por otra parte la dolomita calcinada mostró una disminución del Ca al aumentar la dosis, mientras que las demás fuentes aumentaron el nivel de Ca conforme aumentó las dosis. Lo anterior confirma lo obtenido en plantaciones de naranja Valencia (Molina y Rojas 2006), donde hubo un incremento en el contenido de Ca intercambiable al subir las dosis de enmiendas, durante el período de evaluación (6 a 24 meses).



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

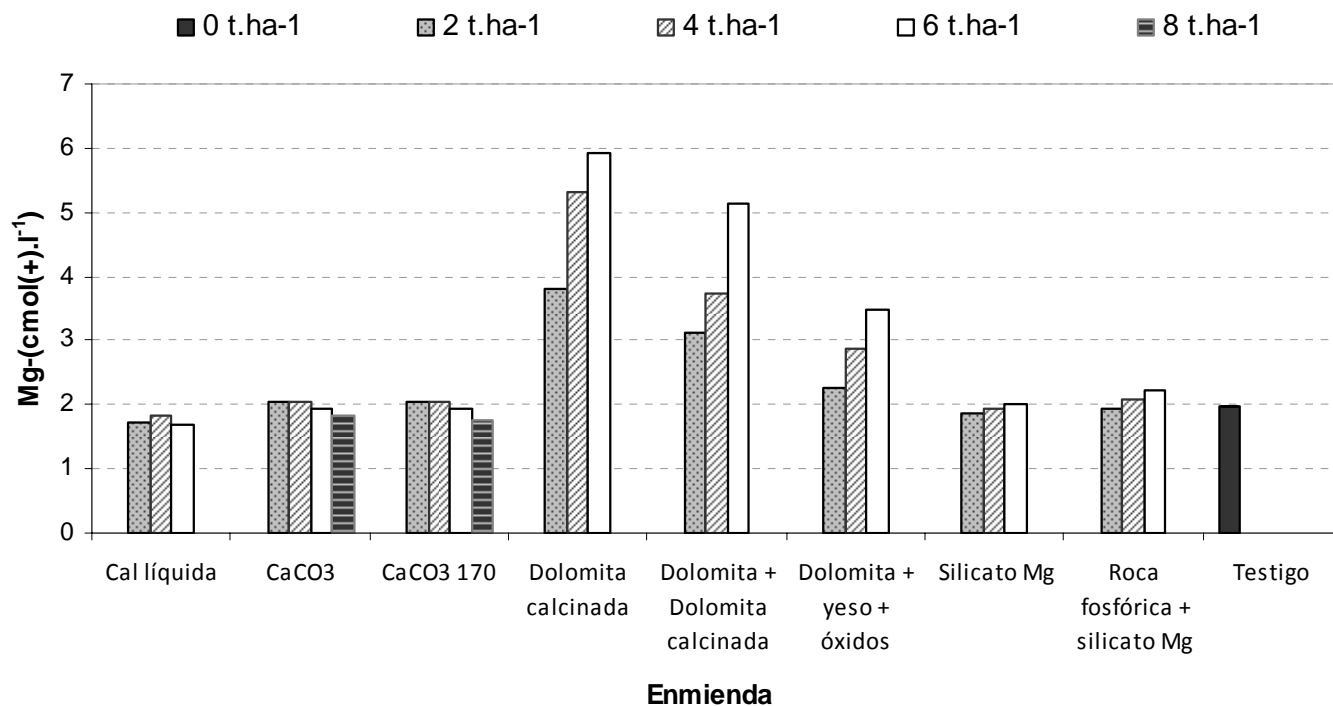
Figure 7. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de Ca del suelo 12 semanas después de la siembra.

Estadísticamente, los datos referentes al Ca presentaron diferencias significativas en todas las aplicaciones de CaCO_3 y CaCO_3 170, con excepción de la dosis de $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de ésta última (Cuadro 6 del Anexo).

Al igual que en la variable de acidez (Cuadro 5), la mezcla de dolomita + yeso + óxidos y cal líquida se diferenciaron del testigo solamente al utilizar dosis de $6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $16 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 6 del Anexo)

Los tratamientos con dolomitas presentaron los valores más altos de Mg, seguidos de la mezcla de dolomita + yeso + óxidos (Figura 8), lo cual era esperable debido a la presencia de Mg en su composición química, por lo cual se incrementó el contenido de este elemento en el suelo.

El silicato de Mg no mostró un incremento en el contenido de Mg, a pesar de que tiene 19,2% de Mg, lo cual se pudo deber a la menor fineza del material con respecto a las demás fuentes, que redujo la tasa de disolución en el suelo. Este material no parece ser una fuente de Mg adecuada a corto plazo.

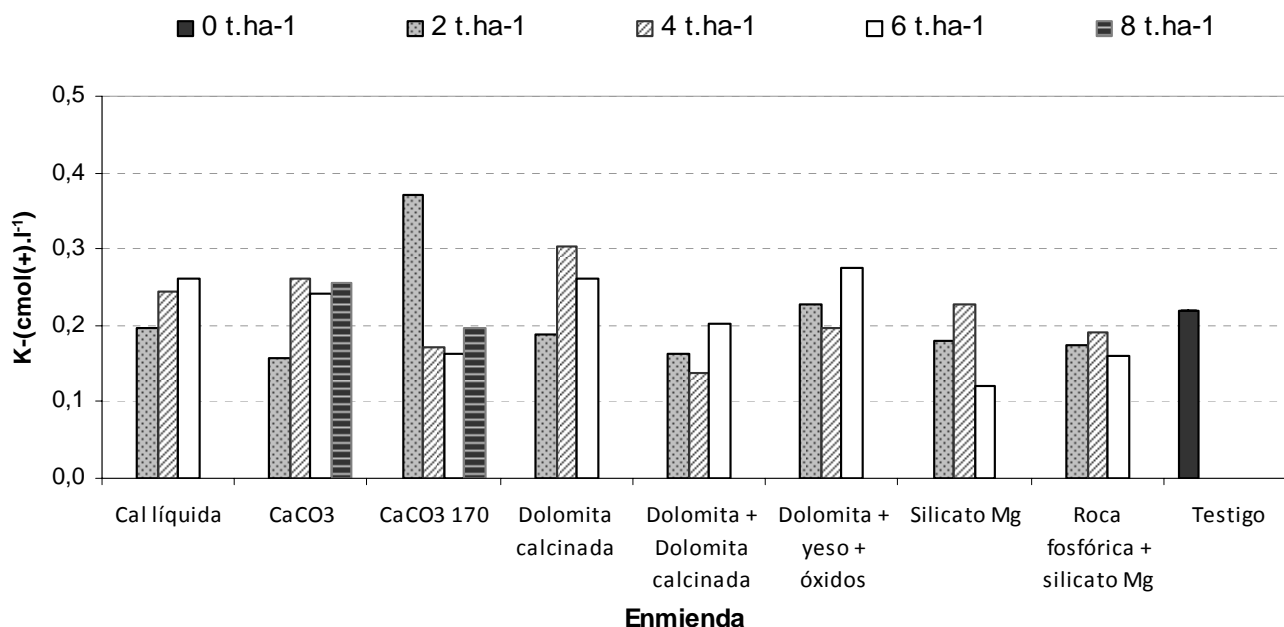


Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 8. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de Mg del suelo 12 semanas después de la siembra.

Las demás fuentes utilizadas no afectaron el contenido de Mg en el suelo debido a la ausencia de Mg en estas enmiendas. Las dolomitas calcinadas sola o en mezcla con dolomita, presentaron el valor más alto de Mg, probablemente debido a la presencia de óxido de magnesio en estos materiales que es mucho más reactivo que los carbonatos de magnesio (Alcarde 1992).

No hubo efecto significativo de las enmiendas en el contenido de K en el suelo (Figura 9).



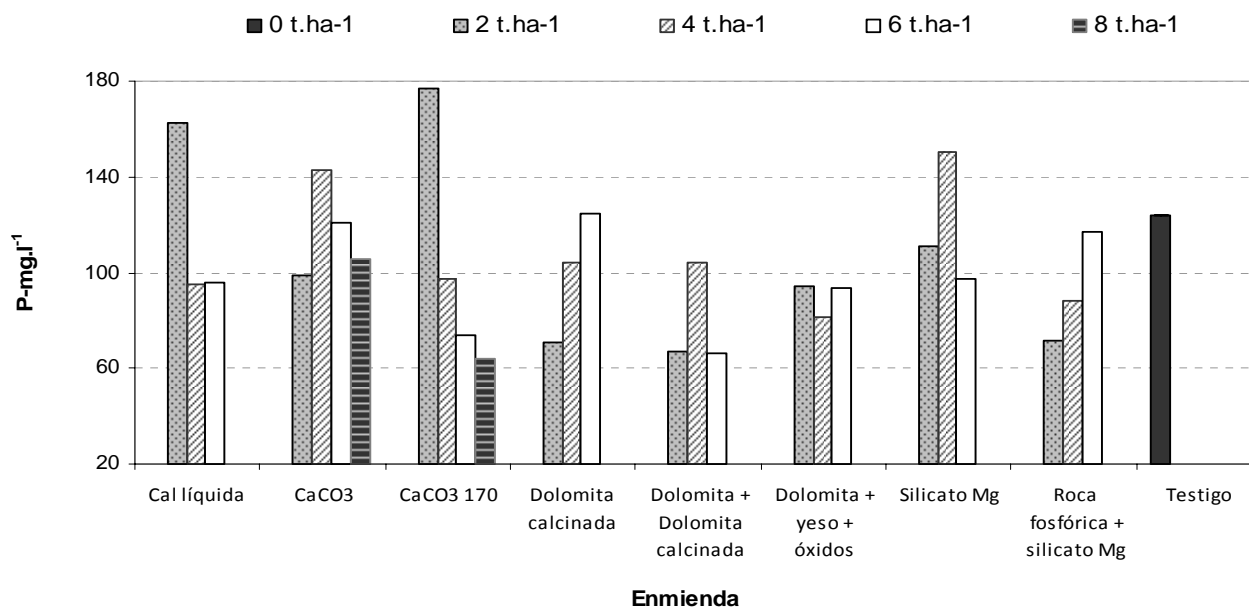
Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 9. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de K del suelo 12 semanas después de la siembra.

5.2.5 Fósforo

No hubo diferencias significativas entre tratamientos con el contenido de P disponible en el suelo. Sin embargo, la concentración de P disminuyó con el incremento en la dosis de las enmiendas que aportaron principalmente Ca, tales como los carbonatos de Cal y la enmienda líquida (Figura 10). Las enmiendas con dolomita no mostraron cambios en el contenido de P, y la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg subió el nivel de debido al suministro de este elemento por parte de la roca.

Es bien conocido que una dosis alta de enmienda cálcica reduce la disponibilidad de P al formar compuestos insolubles de fosfatos tricálcicos en el suelo (Bertsch 1995, Tisdale et al. 1993).



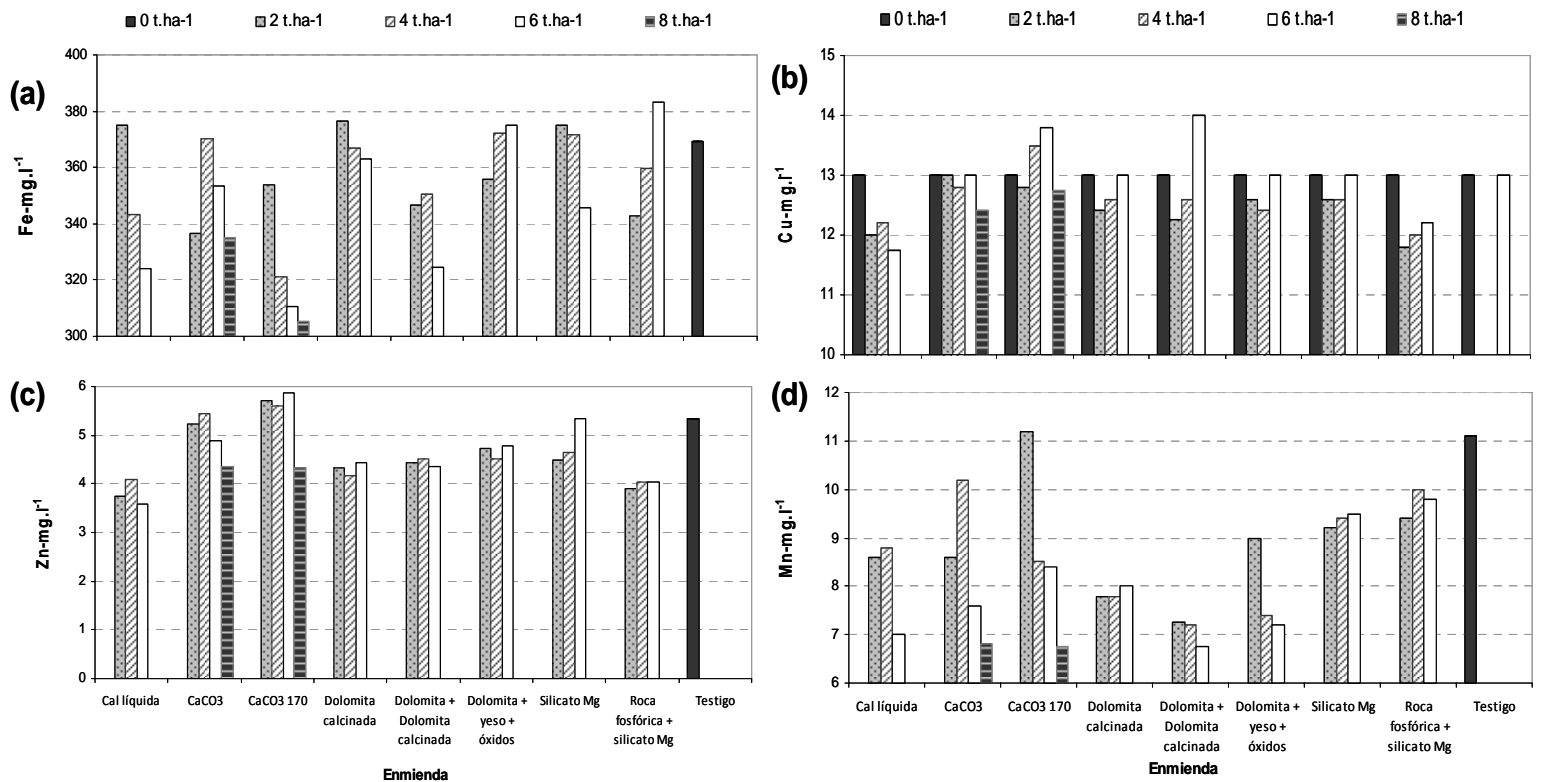
Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 10. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de P del suelo 12 semanas después de la siembra.

5.2.6 Micronutrientos

Hubo diferencias significativas entre tratamientos en la concentración de Fe en el suelo (Cuadro 7 del Anexo). Con la mayoría de las enmiendas, el aumento en la dosis disminuyó la concentración de Fe, probablemente debido a que al subir el pH se reduce la disponibilidad de este elemento. Sin embargo, el contenido de Fe se mantuvo siempre por encima de 300 mg.l⁻¹, que es considerado como un nivel muy alto (Berstch 1995)

No hubo cambios en la concentración de Cu y Zn con la aplicación de enmiendas (Figura 11). El contenido de Mn disminuyó levemente al aumentar las dosis de algunas enmiendas, principalmente con los carbonatos de calcio debido probablemente al incremento en el pH que disminuyó la disponibilidad de Mn (Tisdale et al. 1993).



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 11. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de micronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.

5.3 Efecto de las enmiendas en el contenido de nutrientes foliares

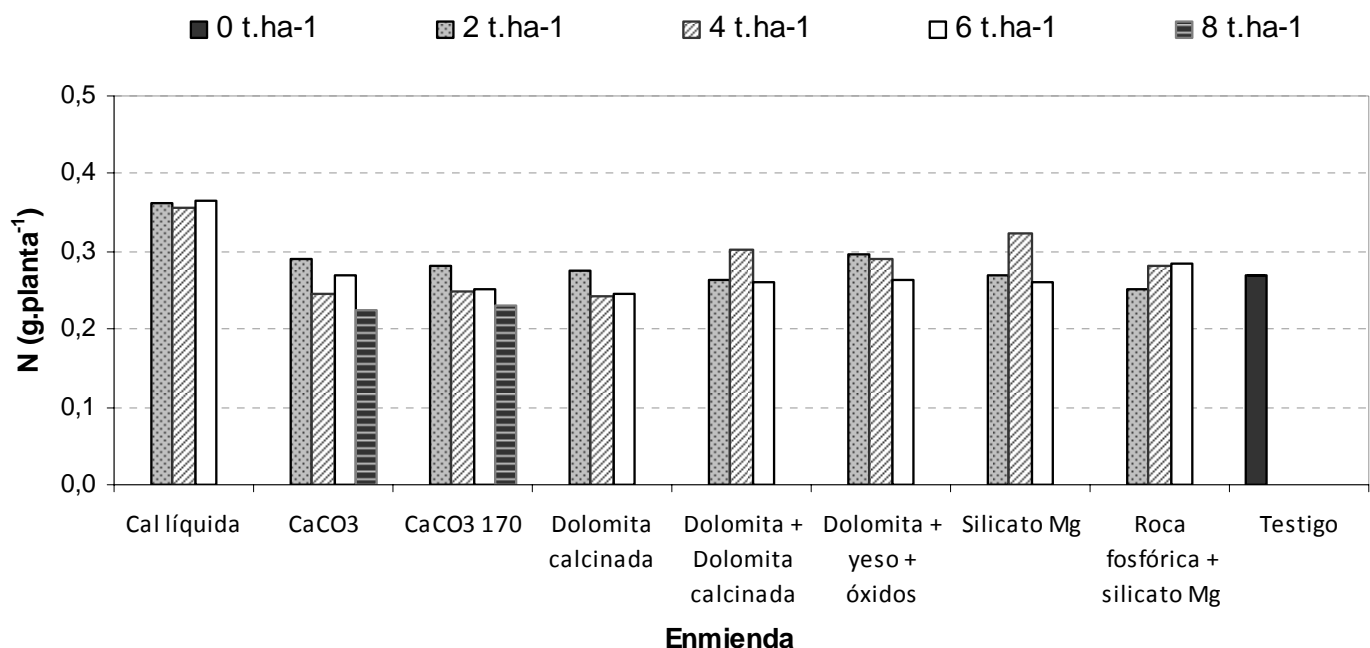
5.3.1 Macronutrientes

Con relación a los contenidos de N obtenidos en las plantas al final de la evaluación, al utilizar la enmienda líquida se obtuvieron los mayores valores del nutriente con respecto a las demás enmiendas, independientemente de la dosis utilizada (Figura 12). Este efecto podría ser producto del aporte de 6,9% de N en forma de urea presente en la composición química de la fuente, promoviendo una mejor respuesta a su aplicación (Suplidora Verde 2010).

Anteriormente se mencionó que la enmienda líquida fue la que produjo mayor área foliar y mayor número de hojas a cosecha (Figura 22 y Cuadro 2), confirmando con este resultado la importancia de este nutrimento en la producción de hojas y materia vegetal (Soto 1992).

A diferencia de la enmienda líquida, las demás fuentes no contienen N. Sin embargo, el silicato de Mg, la dolomita+ dolomita calcinada y la mezcla de dolomita + yeso + óxidos presentaron los mayores valores de N en la dosis de 4 t.ha⁻¹, después de la cal líquida, por el contrario, otras enmiendas como CaCO₃, CaCO₃ 170 y dolomita calcinada disminuyeron en esa misma dosis.

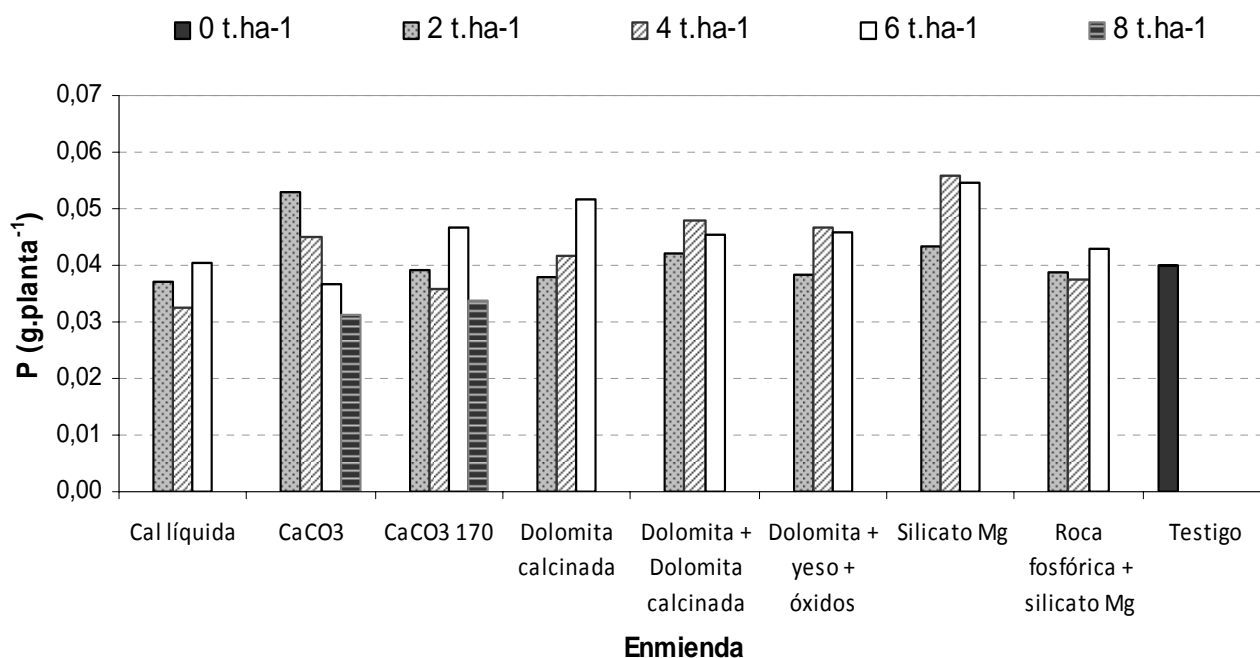
Estadísticamente ningún tratamiento difirió significativamente con respecto al testigo (Cuadro 8 del Anexo), aunque la cal líquida (8 y 16 l.ha⁻¹) mostró diferencias significativas con respecto al CaCO₃ (4 y 8 t.ha⁻¹), CaCO₃ 170 (8 t.ha⁻¹) y a la dolomita calcinada (4 y 6 t.ha⁻¹).



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 12. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de N en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

Las tendencias obtenidas en la absorción de P y K fueron muy similares para cada una de las enmiendas. Se observa que ambos nutrientes fueron absorbidos en mayor cantidad al aplicar silicato de Mg y por el contrario hubo menor absorción de los mismos al aplicar la enmienda líquida. Por otra parte en el CaCO_3 se observó un comportamiento decreciente muy marcado conforme aumentó la dosis tanto en los contenidos de P como de K (Figuras 13 y 14).

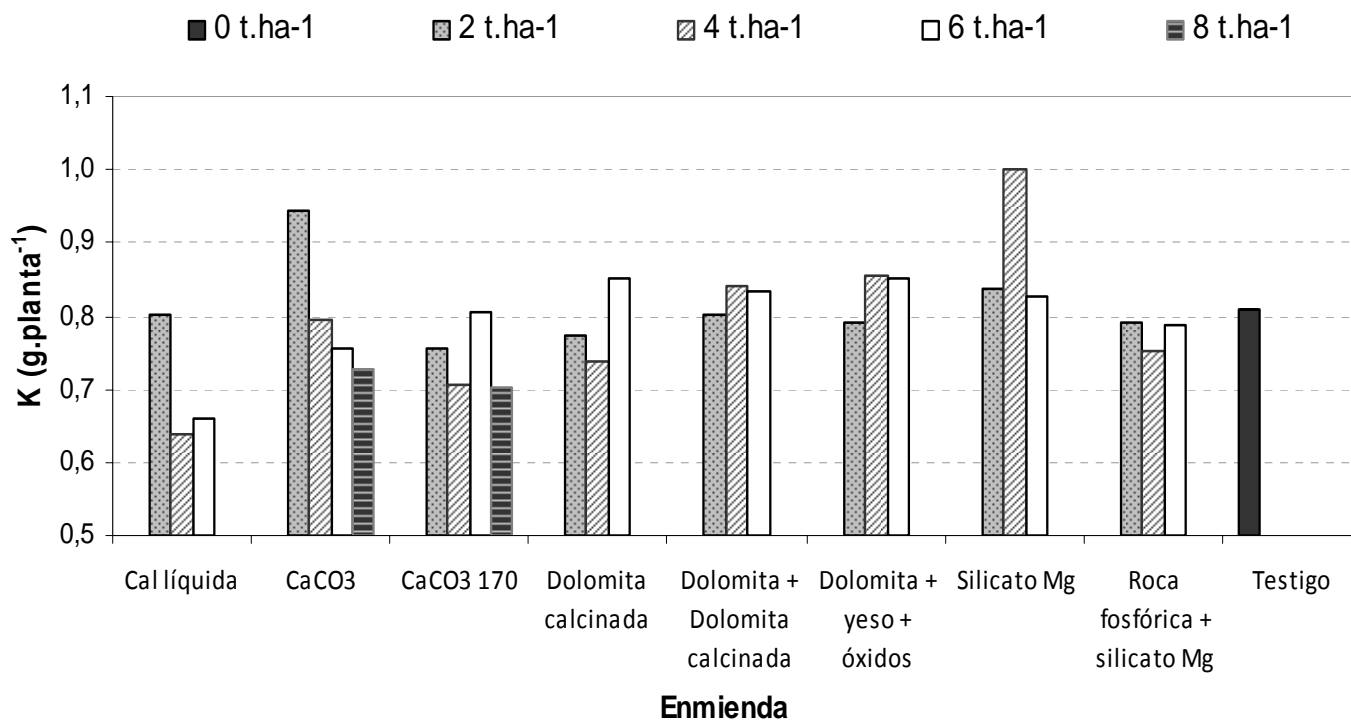


Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 13. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de P en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

Al igual que en el N los tratamientos no mostraron diferencias significativas con respecto al testigo en la absorción de P y K (Cuadro 8). Sin embargo, se observaron algunas tendencias entre las fuentes con respecto al P, como por ejemplo el silicato de Mg, que en las dosis bajas difiere significativamente en mayor medida del CaCO_3 a 8

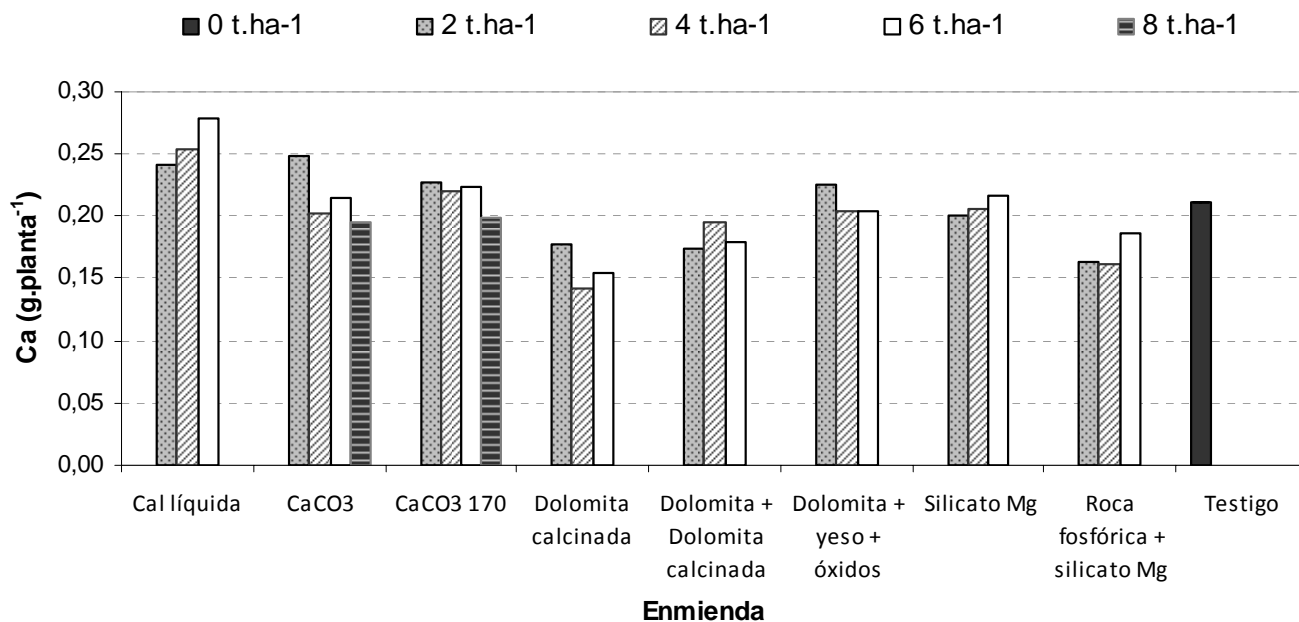
t.ha⁻¹ y la cal líquida a 12 l.ha⁻¹ y en menor medida de CaCO₃ a 6 t.ha⁻¹ y CaCO₃ 170 (4 y 8 t.ha⁻¹) y con respecto al K, entre el silicato de Mg 4 t.ha⁻¹ y la cal líquida 12 l.ha⁻¹.



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 14. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de K en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

La Cal 56 presentó el valor más alto de Ca absorbido en la dosis de 16 l.ha⁻¹ (Figura 15), mientras que la mezcla de roca fosfórica + silicato de Mg y la dolomita calcinada presentaron los valores más bajos de Ca, incluyendo el testigo. Aunque no hubo diferencias significativas con el testigo y con la mayoría de los demás tratamientos.

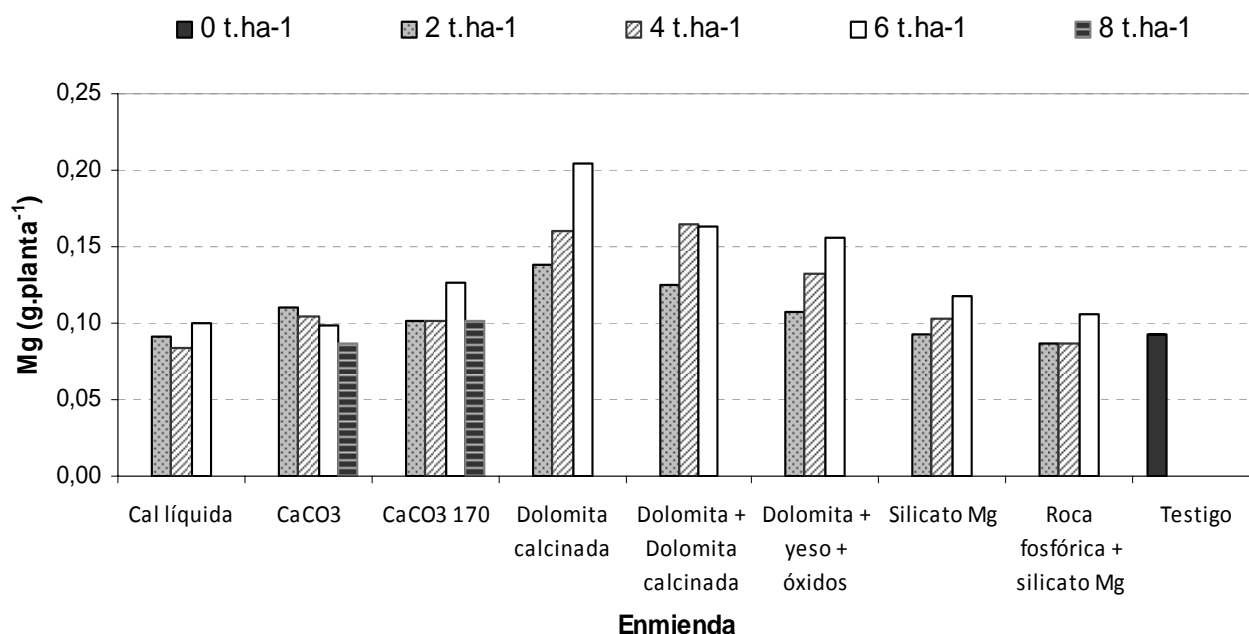


Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 15. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en absorción de Ca en plantas de banana 12 semanas después de la siembra.

Las dolomitas muestran los valores mayores y tendencias de aumento de absorción de Mg (Figura 16) y la cal líquida presentó los valores menores de Mg. Además se observó una disminución de la absorción de Mg al utilizar la dosis más alta de 8 t.ha⁻¹ en los tratamientos con CaCO₃ 170 y CaCO₃.

Algunos tratamientos con dolomita, tales como dolomita calcinada y dolomita + dolomita calcinada a 4 y 6 t.ha⁻¹ y la mezcla de dolomita + yeso + óxidos a 6 t.ha⁻¹ mostraron diferencias significativas con relación al testigo y a los demás tratamientos (Cuadro 8).



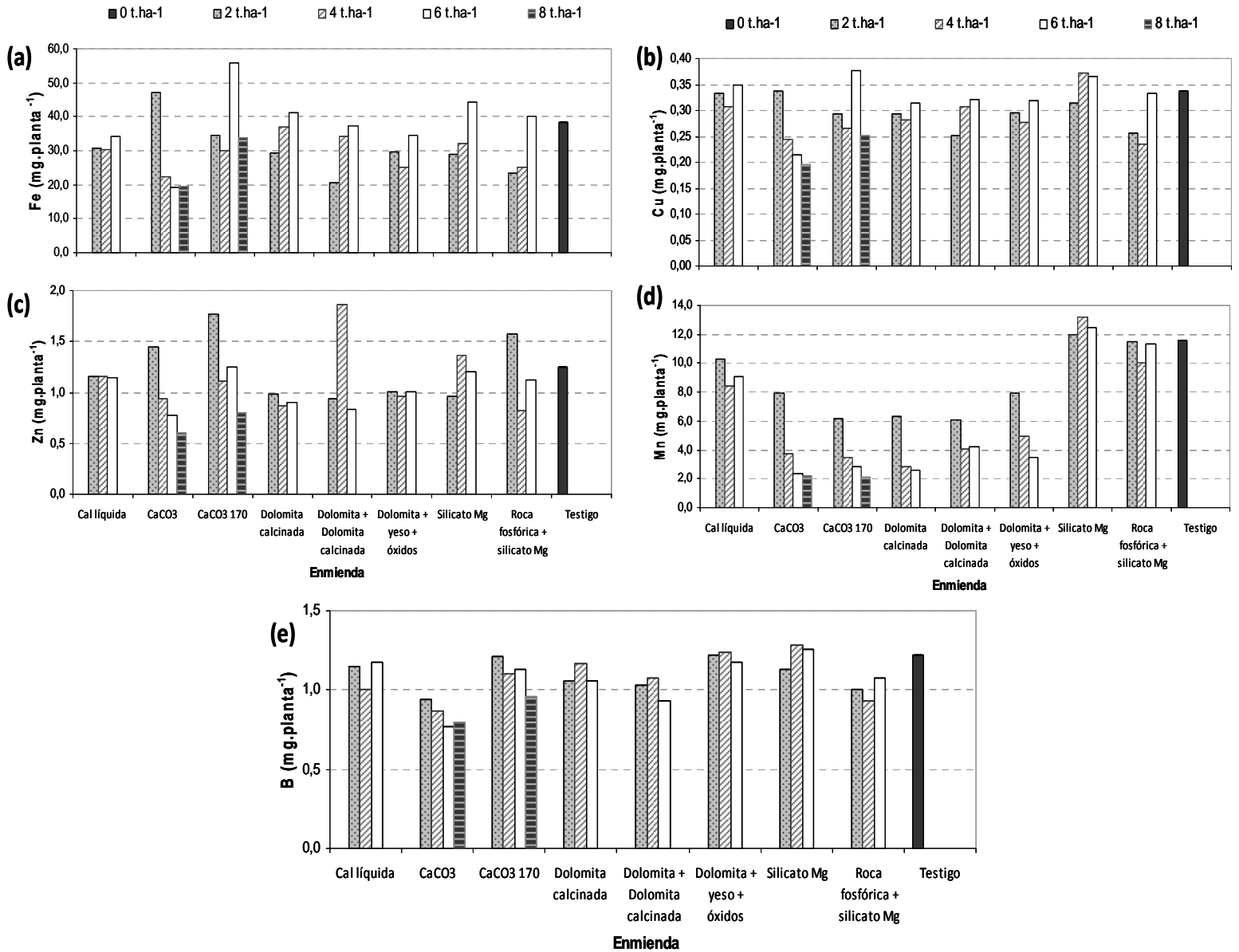
Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 16. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de Mg en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

No hubo diferencias significativas entre tratamientos en la absorción de S (Cuadro 8 del anexo).

5.3.2 Micronutrientos

En general, los contenidos de micronutrientos analizados en las plantas disminuyeron al aumentar los niveles de las enmiendas, debido a que el incremento en pH disminuyó su disponibilidad (Tisdale et al. 1993), sin embargo, la mayoría no mostró diferencias significativas con respecto al testigo y a las demás fuentes (Figura 17 y Cuadro 9).



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 17. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de micronutrientes en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

5.4 Estudio económico de la aplicación de los tratamientos de enmienda

Las dosis real de enmiendas fueron estimadas para la aplicación en la mitad de la banda de fertilización de cada planta, que correspondió a un área útil de $0,56 \text{ m}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$, para un total de $1017 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ con base en un densidad de $1800 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$ (ver segunda columna del Cuadro 4), tal y como se describió en la metodología.

El precio de cada enmienda se presentó en la tercera columna del cuadro 4. Con base en este precio y la dosis real a utilizar, se hizo la estimación del costo por hectárea de cada tratamiento, que se presentó en la cuarta columna del Cuadro 4.

Los dos carbonatos de calcio fueron los tratamientos de menor costo debido a que son productos obtenidos de yacimientos locales. Las enmiendas con dolomita presentaron un costo entre dos y tres veces superior al carbonato de calcio. La roca fosfórica, el silicato de magnesio y la cal líquida mostraron costos superiores a las dolomitas.

En general, los carbonatos de calcio fueron más efectivos para neutralizar la acidez y mejorar la fertilidad del suelo y su costo es inferior a otras enmiendas con Mg y otros materiales, también presentaron un costo más bajo por unidad de PRNT.

Las dolomitas corresponden a la mejor opción para incrementar el contenido de magnesio, y aunque la tonelada de dolomita + dolomita calcinada tiene menor costo, se requiere alrededor del doble de ésta para obtener valores similares del nutrimento con respecto a la dolomita calcinada, por lo que esta última constituye una mejor opción.

Cuadro 4. Estimación de costos de los diferentes tratamientos de enmienda.

Fuente	Dosis	Dosis real	Costo.t ⁻¹	Costo.ha ⁻¹	Costo.unidad PRNT ⁻¹	PRNT
	(t.ha ⁻¹)	(t.ha ⁻¹)	de enmienda (\$)	(\$)	(\$)	(%)
Carbonatura (Carbonato calcio)	2	0,2	75	15,0	0,8	93,0
	4	0,4	75	30,0	0,8	93,0
	6	0,6	75	45,0	0,8	93,0
	8	0,8	75	60,0	0,8	93,0
Carbonato calcio 170 (Sur)	2	0,2	75	15,0	0,8	98,0
	4	0,4	75	30,0	0,8	98,0
	6	0,6	75	45,0	0,8	98,0
	8	0,8	75	60,0	0,8	98,0
Dolomita calcinada	2	0,2	240	48,0	1,3	192,0
	4	0,4	240	96,0	1,3	192,0
	6	0,6	240	144,0	1,3	192,0
Dolomita 70% + Dolomita Calcinada 30%	2	0,2	180	36,0	1,4	125,0
	4	0,4	180	72,0	1,4	125,0
	6	0,6	180	108,0	1,4	125,0
Supercal (dolomita + yeso + óxidos)	2	0,2	240	48,0	2,3	104,0
	4	0,4	240	96,0	2,3	104,0
	6	0,6	240	144,0	2,3	104,0
Fostech (roca fosfórica + silicato Mg)	2	0,2	420	84,0	6,0	70,0
	4	0,4	420	168,0	6,0	70,0
	6	0,6	420	252,0	6,0	70,0
Prosil (silicato Mg)	2	0,2	350	70,0	4,9	72,0
	4	0,4	350	140,0	4,9	72,0
	6	0,6	350	210,0	4,9	72,0
Cal 56 (cal líquida)	8*	0,8	9	72,0	.	.
	12*	1,2	9	108,0	.	.
	16*	1,6	9	144,0	.	.

Para determinar el costo se tomó en cuenta el costo de los materiales sin la mano de obra.

6. CONCLUSIONES

No hubo diferencias significativas entre los tratamientos con relación a las variables biométricas, posiblemente porque el periodo de evaluación no fue suficientemente largo para que se manifestaran, y que además los contenidos originales de Ca y Mg fueron adecuados para el crecimiento de las plantas.

Los carbonatos de calcio y la dolomita + dolomita calcinada presentaron el mayor efecto en el aumento del pH y reducción de acidez (los dos tipos), siendo el CaCO_3 170 y CaCO_3 a 8 t.ha^{-1} y la dolomita + dolomita calcinada a 6 t.ha^{-1} , los más sobresalientes. La cal líquida también tuvo un efecto favorable de aumentar el pH con la dosis más alta de 16 l.ha^{-1} .

El CaCO_3 170, dolomita + dolomita calcinada y CaCO_3 presentaron el mayor efecto en reducción de la acidez intercambiable y el % de saturación de acidez. La cal líquida y la mezcla de dolomita + yeso + óxidos también mostraron una disminución en estas variables al incrementar las dosis, aunque en menor grado.

La mayoría de las enmiendas subieron los contenidos de Ca en el suelo, con excepción del silicato de Mg con o sin roca fosfórica. Los dos carbonatos de calcio elevaron en mayor medida los niveles de Ca con las dosis de 4, 6 y 8 t.ha^{-1} , seguidas de la mezcla de dolomita + yeso + óxidos.

En cuanto a los contenidos de Mg destacaron las dolomitas en todas las dosis aplicadas, obteniéndose un aumento de 4 y 3 $\text{cmol}(+).\text{l}^{-1}$ de magnesio al utilizar dolomita calcinada y la mezcla de dolomitas, ambas a 6 t.ha^{-1} .

No hubo efecto de las enmiendas en los contenidos de K y P.

El contenido de Fe en el suelo disminuyó al aumentar la dosis de enmiendas cálcicas principalmente.

Los resultados de la absorción de nutrimentos en la planta destacan a la cal líquida, con la cual se obtuvo un valor más alto de N y un aumento en el contenido de Ca al incrementar las dosis.

Con la aplicación de dolomitas se obtuvo una mayor acumulación de Mg en las plantas al aumentar las dosis, al igual que las tendencias mostradas en los contenidos del suelo.

No se obtuvo diferencias significativas de los tratamientos en la absorción de P, K y S.

En general, los contenidos de micronutrimentos analizados en las plantas tendieron a disminuir al aumentar los niveles de las enmiendas, sin embargo la mayoría no mostró diferencias significativas con respecto al testigo y a las demás fuentes.

La cal líquida (Cal 56) presentó un buen control de los parámetros de acidez de suelo con la dosis de 16 l.ha^{-1}

Los carbonatos representan la fuente más económica en costo por hectárea.

Las dolomitas son eficientes para incrementar el contenido de magnesio, por lo que se sugiere el uso en condiciones de deficiencia de este nutrimento.

7. LITERATURA CITADA

- AGROMSA. 2010. Hoja técnica de Dolomita calcinada. Agromsa, Guatemala. 5 p.
- AGROMSA. 2011. Hoja técnica Supercal. Agromsa, Guatemala. 3 p.
- ALCARDE J.C. 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretacoes técnicas. ANDA, Sao Paulo, Brasil. Boletim Técnico No. 6. 26 p.
- AMARAL A.S. 2002. Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 106 p.
- ANSORENA J. 1995. El suelo en la agricultura y el medio ambiente (II). Laboratorio Agrario. Depto de Agricultura y espacios naturales. Diputación Floral de Gipuzcoa, San Sebastián, España.
- AUBERT B. 1971. Action du climat sur le comportement du bananier en zones tropicales et subtropicales. *Fruits* 26(3): 175-187.
- BALIGAR V.C., BEAVER W.V., AHLRICHS J.L. 1998. Nature and distribution of acid soils in the world. In: R.E. Schaffert (ed). *Proceedings of Workshop to Development a Strategy for Collaborative Research and Dissemination of Technology in Sustainable Crop Production in Acid Savannas and other Problem Soils of the World*, Purdue University, USA. p. 1-12.
- BARBER S. 1984. Liming materials and practices. In F. Adams (ed). *Soil acidity and liming*. 2 ed. Madison, Wisconsin, USA. p. 171-209.
- BERNIER R., ALFARO M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. INIA. Osorno, Chile. 46 p.
- BERTSCH F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica. 57 p.
- BOHNEN H. 2000. Acidez do solo: Origem e correção. In . Kaminski (ed.), *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*, Boletim Técnico No. 4, Pelotas: Núcleo Regional Sul, Brasil. p. 9-19.

- CARBALLO L., MOLINA E. 1993. Caracterización física y química de materiales de encalado en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2):105-110.
- CAREY P., KETTERINGS Q., HUNTER M. 2006. Liming materials. Hoja divulgativa de agronomía #7. Universidad de Cornell, Nueva York, Estados Unidos. 2 p.
- CHAVES M.A. 1993. Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo. DIECA, San José, Costa Rica. 41 p.
- CHIQUITA. 2010. Evaluación preliminar de seis enmiendas inorgánicas en el control de la acidez intercambiable a través del perfil de suelo. Documento interno, Chiquita CTO, San José, Costa Rica. 2p.
- CORBANA. 2011. Estadísticas de exportación bananera 2010. CORBANA, San José, Costa Rica. 734 p.
- DÍAZ-ROMEY R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 68 p.
- DÓNDOLI C., DENG G., MALAVASSI E. 1968. Mapa geológico de Costa Rica. San José, Dirección de Geología, Minas y Petróleo. Esc. 1:700000 color.
- ERNANI P.R., NASCIMENTO J.A.L., OLIVEIRA L.C. 1998. Increase of grain and green matter of corn by liming. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22: 275-280.
- ESPINOSA J., MOLINA E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. INPOFOS, Quito, Ecuador. 42 p.
- FASSBENDER H., BORNEMISZA E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2^{da} ed, IICA, San José, Costa Rica. 420 p.
- GOEDERT W.J., LOBATO E., LOURENÇO S. 1997. Nutrient use efficiency in Brazilian acid soils: Nutrient management and plant efficiency. In A.C. Moniz, A.M.C. Furlani, R.E.Schaeffert (eds). *Plant-soil interactions at low pH sustainable agriculture and forestry production*, Brazilian Soil Science Society, Campinas, Brasil. p. 97-104.

- INPOFOS. 1997. Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Instituto de la Potasa y Fosfato, Quito, Ecuador. 140 p.
- JIMÉNEZ T. 1972. Génesis, clasificación y capacidad de uso de algunos suelos de la Región Atlántica de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 180 p.
- KAMPRATH E. 1984. Crop response to lime in soils of the tropics. In F. Adams (ed). Soil acidity and liming, ASA, Wisconsin. p. 349-369.
- LARA F. 1970. Problemas y procedimientos bananeros en la zona Atlántica de Costa Rica. Edit. Hermanos Trejos, San José, Costa Rica. p. 11-12.
- LASSOUDIÈRE A., PINNON A. 1971. Indications preliminaires sur des essais de desherbage chimique en bananeraie. Fruits 26(5): 333-349.
- LÓPEZ A., ESPINOSA J. 2000. Manual de nutrición y fertilización del banano. Instituto de la Potasa y el Fosfato, Quito, Ecuador. 86 p.
- MEHLICH A. 1984. Mehlich 3 soil extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. Communications in Soil Science and Plant Analysis 15: 1409-1416.
- MOLINA E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. ACCS, San José, Costa Rica. 45 p.
- MOLINA E., ROJAS A. 2006. Efecto del encalado en el cultivo de naranja Valencia en la Zona Norte de Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(3): 81-95.
- PETERS J.B., KELLING K.A., SCHULTE E.E. 1996. Choosing between liming materials. University of Wisconsin, Madison, Extension Cooperative Publication A3671. 4 p.
- PIAGESSI A. 2004. Los microelementos en la nutrición vegetal. Valagro, Italia. 72 p.
- PÖTTKER D. 2002. Correção da acidez do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 5, Resumos. Cooperativa Agrária, Guarapuava, Paraná, Brasil p. 54-62.
- PÖTTKER D., BEN J.R. 1998. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Rio Grande do Sul. In N.J. Nuernberg (ed). Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto, Santa Catalina, Brasil. p. 77-92.

- RAIJ B. VAN, QUAGGIO J.A., CANTARELLA H., FERREIRA M.E., LOPES A.S., BATAGLIA O.C. 1987. Análise química do solo para fins de fertilidade. Fundação Cargill, Instituto Agrônômico, São Paulo, Brasil. 170 p.
- RAIJ B. VAN. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. INPOFOS, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 343 p.
- SALET R.L., ANGHINONI I., KOCHHANN R.A. 1999. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. Revista Científica Unicruz 1(1): 9-13.
- SÁNCHEZ P. 1981. Suelos del Trópico. Características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 634 p.
- SÁNCHEZ P.A., SALINAS J.G. 1983. Suelos ácidos: estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. 93 p.
- SERRANO E. 2002. Diagnóstico físico-químico del suelo y su relación con el crecimiento del cultivo del banano en fincas con diferentes condiciones edafoclimáticas de la zona Caribe de Costa Rica. In J. Sandoval (ed). Informe anual 2002, Dirección de Investigaciones, CORBANA, San José, Costa Rica. p. 113-117.
- SERRANO E. 2003. Acidificación de los suelos bananeros de Costa Rica y su relación con la toxicidad de aluminio en las raíces del cultivo de banano. In D. Turner y F. Rosales (eds). Simposio Internacional del Sistema Radical del Banano: hacia un mejor conocimiento para su manejo productivo, noviembre 3-5. INIBAP-CORBANA, San José, Costa Rica. p. 142-148.
- SERRANO E. 2005. Banana soil acidification in the Caribbean coast of Costa Rica and its relationship with increased aluminium concentrations. In D. Turner, F. Rosales (eds). Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. Proceedings of an International Symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003. p. 142-148.
- SOLÍS P., LÓPEZ A. 1994. Aplicación de diferentes niveles de cal dolomítica en el cultivo de banano. In Informe Anual, Corporación Bananera Nacional. San José, Costa Rica. p. 25-28.
- SOTO M. 1992. Bananos cultivo y comercialización. 2^{da} ed., Edit. Lil, San José, Costa Rica. 649 p.

- SPEEDING C. R. W. 1979. Ecología de los sistemas agrícolas. Editorial Blume, Madrid, España. p. 89-103.
- SUPLIDORA VERDE 2010. Aspectos técnicos de Cal 56. Hoja Técnica, Suplidora Verde, Cartago, Costa Rica. 2 p.
- TISDALE S., NELSON W., BEAT J., HAVLIN J. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 5^{ta} ed. Mc Millan, Columbus, USA. 378 p.
- WALKLEY A., BLACK I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38.
- WIETHÖLTER S. 2002. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4, Resumos, Porto Alegre, Brasil. sp.
- ZAPATA R. 2004. La química de la acidez del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín, Colombia. 207 p.

8. ANEXOS

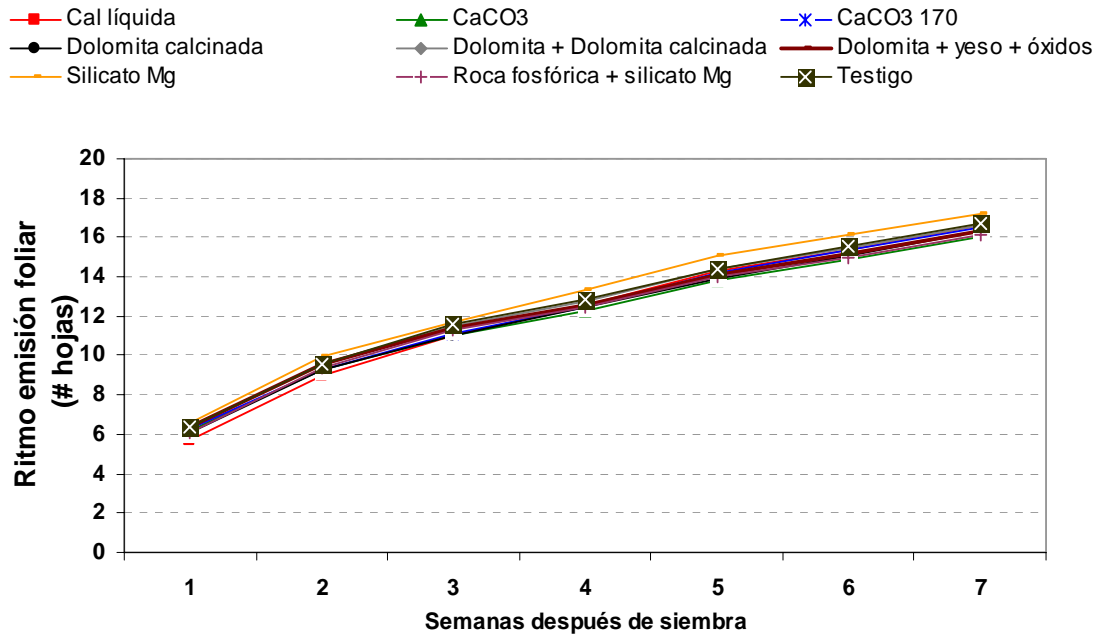


Figure 18. Efecto de fuentes de enmienda en el ritmo de emisión foliar de plantas de banano bajo condiciones de vivero.

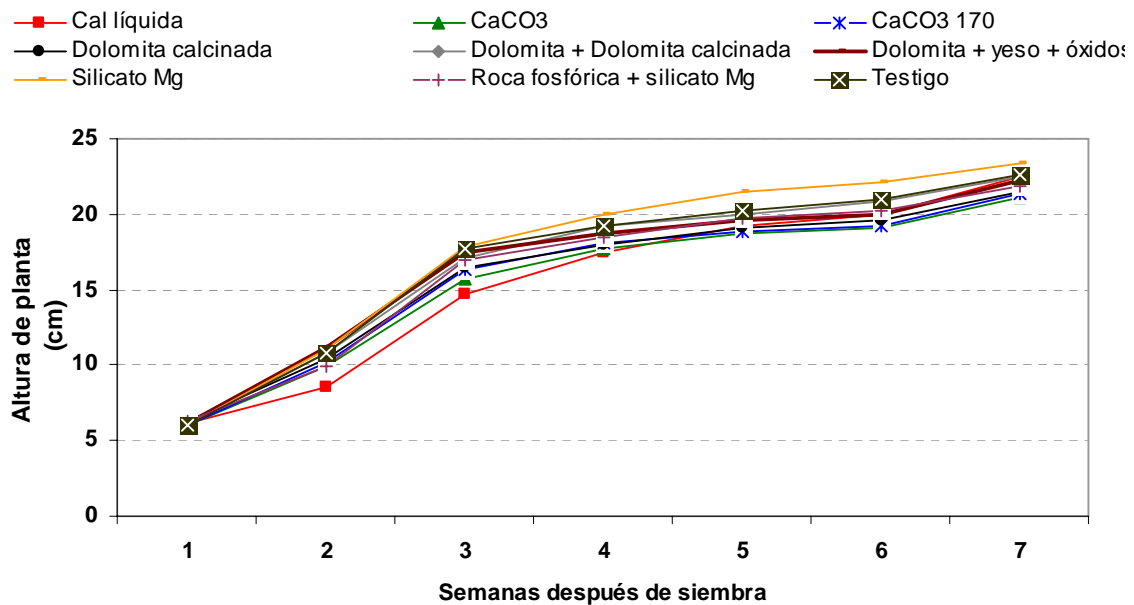


Figure 19. Efecto de fuentes de enmienda en la altura de plantas de banano bajo condiciones de vivero.

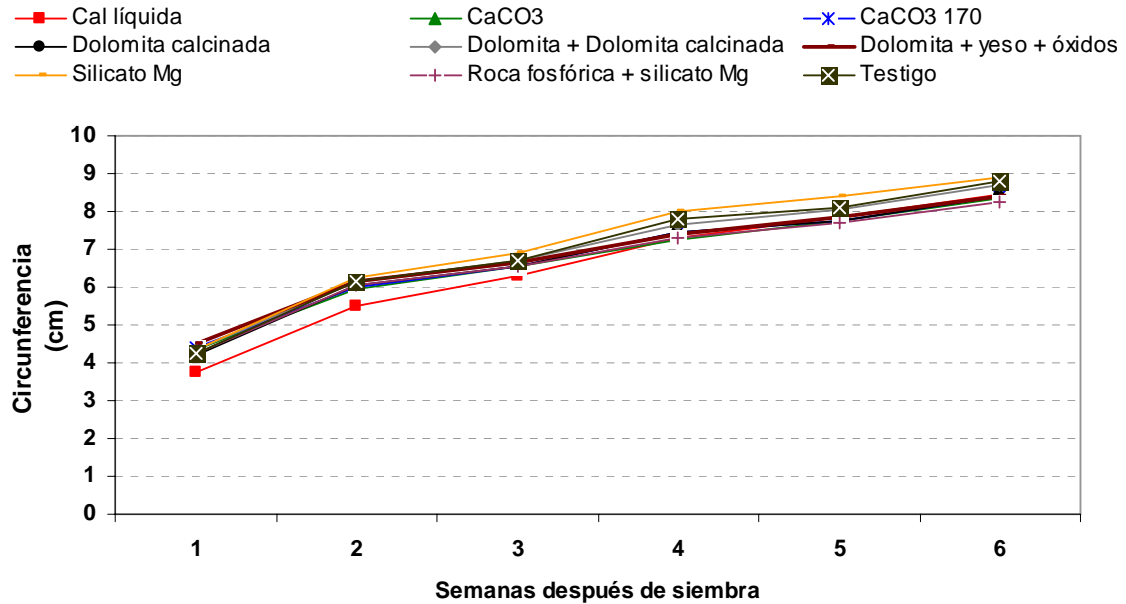


Figure 20. Efecto de fuentes de enmienda en la circunferencia del pseudotallo de plantas de banano bajo condiciones de vivero.

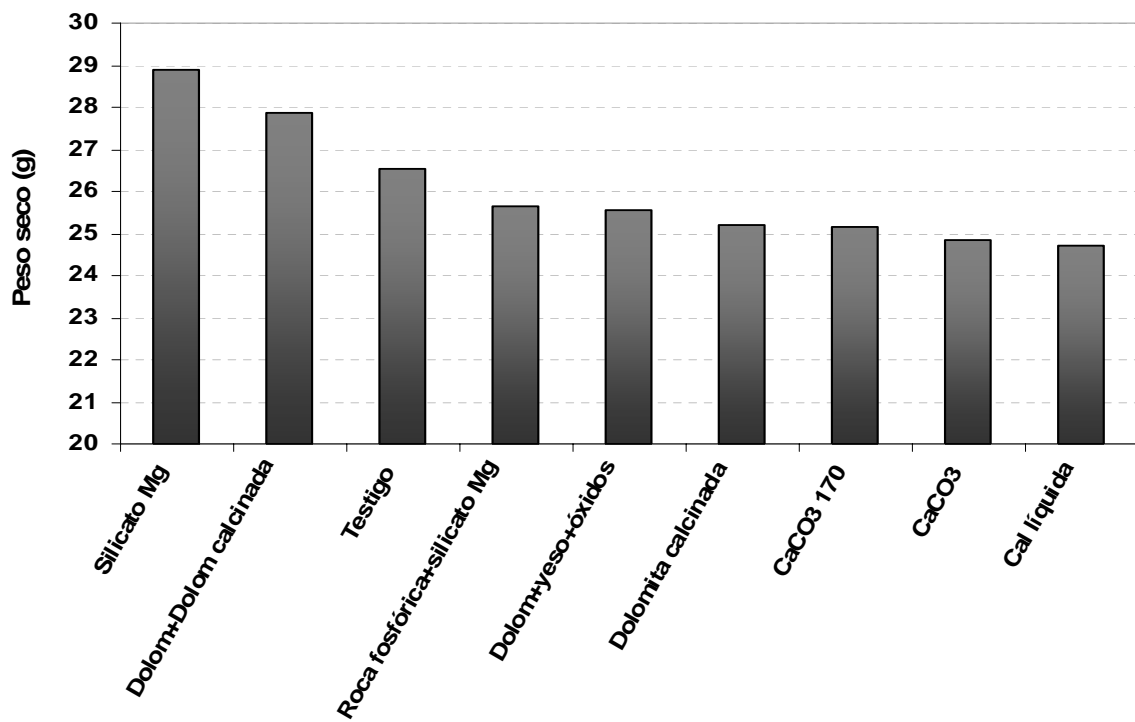


Figure 21. Efecto de fuentes de enmienda en el peso seco de plantas de banano bajo condiciones de vivero.

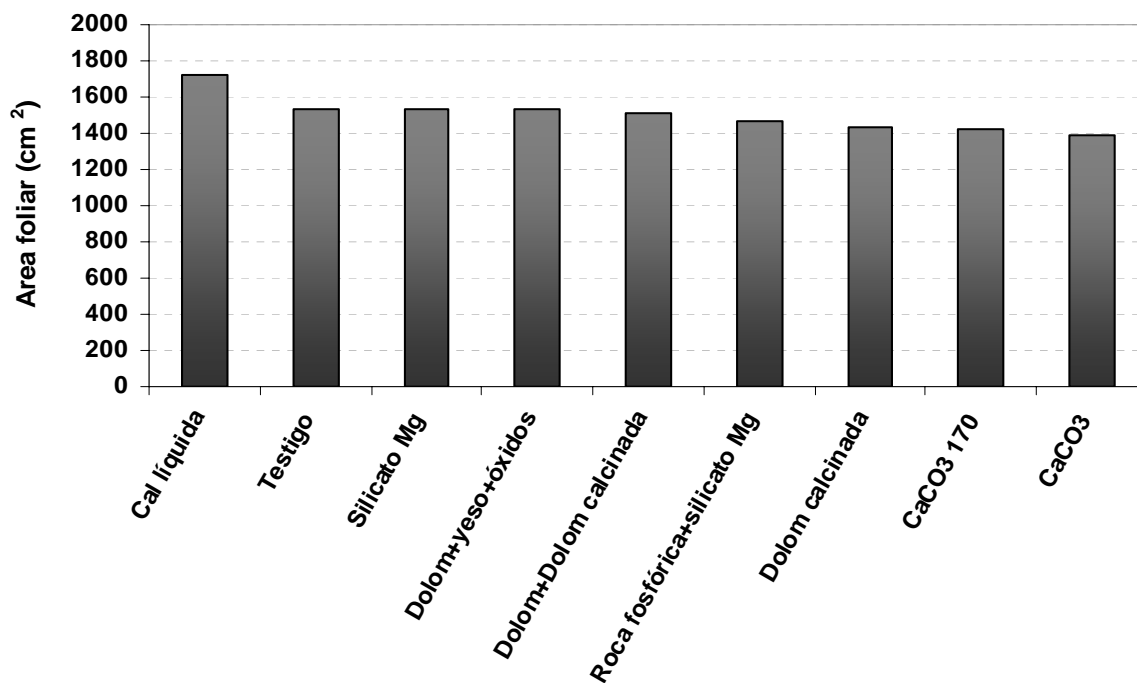


Figure 22. Efecto de fuentes de enmienda en el área foliar de plantas de banano bajo condiciones de vivero.

Cuadro 5. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de pH, acidez intercambiable y materia orgánica del suelo 12 semanas después de la siembra.

Tratamiento	Fuente	ton.ha ⁻¹	pH	Acidez		Acidez no		Saturacion acidez		Saturacion bases		M.O.
				intercambiable	(cmol(+).l ⁻¹)	intercambiable			(%)	(%)		
1	CaCO ₃	2	5,49 cdefgh	1,82 cdefgh	9,92 abcde	14,40 cdef	52,27 efg hij	2,36 ab				
2	CaCO ₃	4	5,32 defgh	1,79 cdefgh	9,40 bcdefgh	13,14 cdefg	56,21 cdefgh	2,39 ab				
3	CaCO ₃	6	5,81 abcde	0,67 gh	7,06 hi	4,61 efg	66,60 abc	2,18 ab				
4	CaCO ₃	8	6,16 ab	0,38 gh	6,04 i	2,72 fg	70,33 ab	2,03 ab				
5	CaCO ₃ 170	2	5,17 fgh	2,70 abcde	9,80 abcdef	20,65 abcd	51,306 fghij	2,48 ab				
6	CaCO ₃ 170	4	5,82 abcd	0,80 gh	7,30 fghi	6,07 efg	62,96 abcde	2,42 ab				
7	CaCO ₃ 170	6	6,13 ab	0,27 h	5,96 i	2,02 fg	69,20 ab	2,42 ab				
8	CaCO ₃ 170	8	6,25 a	0,18 h	5,34 i	1,31 g	71,57 a	1,86 b				
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	5,37 defgh	2,87 abcd	9,75 abcdefg	22,66 abc	50,11 fghij	2,11 ab				
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	5,47 defgh	1,81 cdefgh	8,68 cdefgh	13,51 cdefg	52,21 cdefgh	2,06 ab				
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	5,69 abcdefgh	0,94 fgh	7,51 efg hi	6,45 efg	64,52 abcd	2,12 ab				
12	dolomita calcinada	2	5,48 cdefgh	1,80 cdefgh	8,64 cdefgh	13,48 cdefg	57,23 cdefgh	2,08 ab				
13	dolomita calcinada	4	5,69 abcdefg	1,08 efg h	7,28 ghi	7,87 defg	63,61 abcd	2,09 ab				
14	dolomita calcinada	6	5,62 abcdefgh	1,13 efg h	7,14 hi	8,43 defg	63,65 abcd	2,49 ab				
15	dolom + dolom calcinada	2	5,61 bcdefgh	1,79 cdefgh	7,79 defghi	14,18 cdefg	58,18 cdefg	2,05 ab				
16	dolom + dolom calcinada	4	5,73 abcdef	1,33 defgh	7,63 fghi	10,47 cdefg	60,13 bcdef	2,14 ab				
17	dolom + dolom calcinada	6	6,05 abc	0,50 g	5,61 i	3,84 efg	79,31 ab	2,18 ab				
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	5,26 defgh	3,54 ab	10,59 abc	29,62 a	44,29 i	2,22 ab				
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	5,27 defgh	3,42 abc	9,89 abcde	27,57 ab	47,56 ghij	2,26 ab				
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	5,24 defgh	3,55 ab	10,59 abc	27,56 ab	46,80 hij	2,17 ab				
21	Silicato Mg	2	5,19 efg h	4,08 a	11,68 ab	31,52 a	43,10	2,19 ab				
22	Silicato Mg	4	5,06 h	4,07 a	11,67 ab	31,66 a	42,89	2,57 a				
23	Silicato Mg	6	5,40 defgh	2,91 abcd	10,30 abcd	23,43 abc	48,13 ghij	2,48 ab				
24	Cal líquida	8*	5,39 defgh	2,61 abcdef	9,80 abcdef	20,48 abcd	50,87 fghij	2,18 ab				
25	Cal líquida	12*	5,46 cdefgh	2,04 bcdefg	8,76 cdefgh	16,40 bcde	54,28 defghi	2,34 ab				
26	Cal líquida	16*	5,78 abcdef	0,98 fgh	7,75 efg hi	7,89 defg	59,62 bcdef	2,20 ab				
27	testigo	0	5,08 gh	4,05 a	11,95 a	31,62 a	42,37	2,46 ab				
<i>Pr>F</i>			<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0037				
<i>diferencia minima significativa test Tukey</i>			0,633	1,711	2,521	12,9990	10,7690	0,6756				

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹.

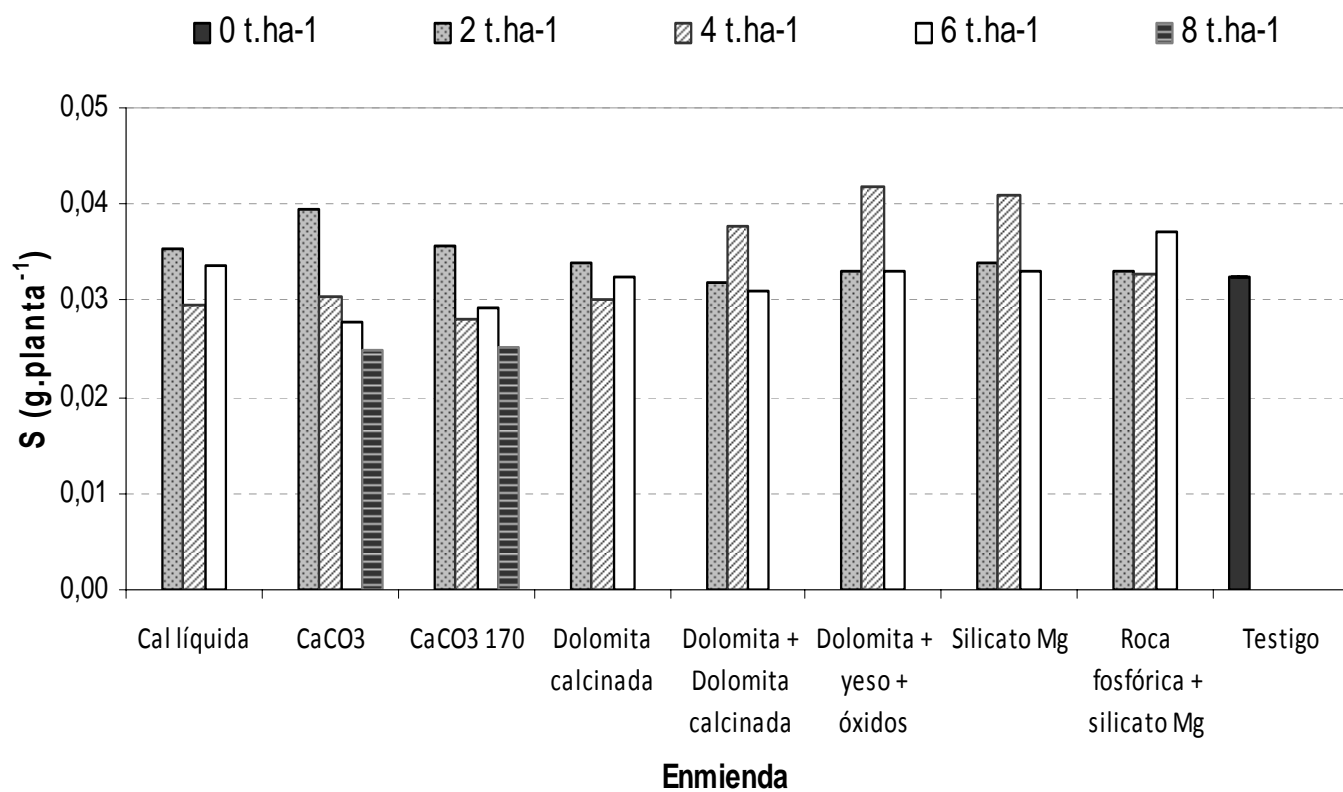
Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con p <0,001.

Cuadro 6. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de macronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.

Tratamiento	Fuente	ton.ha ⁻¹	Ca					Mg		K	P
			(cmol(+).l ⁻¹)								(mg.l ⁻¹)
1	CaCO ₃	2	8,65	efghi			2,05	f	0,16	98,8	
2	CaCO ₃	4	9,75	cdefg			2,05	f	0,26	143,0	
3	CaCO ₃	6	11,94	ab			1,92	f	0,24	120,6	
4	CaCO ₃	8	12,30	a			1,83	f	0,26	106,0	
5	CaCO ₃ 170	2	7,85		ghijkl		2,04	f	0,37	177,2	
6	CaCO ₃ 170	4	10,19	bcde			2,03	f	0,17	97,0	
7	CaCO ₃ 170	6	11,28	abcd			1,95	f	0,16	73,8	
8	CaCO ₃ 170	8	11,48	abc			1,77	f	0,20	63,8	
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	7,35		ijkl		2,25	ef	0,23	94,0	
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	8,49	efghij			2,88	de	0,20	81,4	
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	9,88	cdef			3,47	cd	0,28	93,6	
12	dolomita calcinada	2	7,55		ijkl		3,81	c	0,19	70,8	
13	dolomita calcinada	4	7,09		ijkl		5,31	ab	0,30	104,2	
14	dolomita calcinada	6	6,27		l		5,94	a	0,26	125,0	
15	dolom + dolom calcinada	2	7,55		ijkl		3,12	cd	0,16	67,0	
16	dolom + dolom calcinada	4	7,60		hijkl		3,73	c	0,14	104,0	
17	dolom + dolom calcinada	6	8,05		fghijkl		5,14	b	0,20	66,3	
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	6,29		kl		1,95	f	0,17	71,8	
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	6,69		jkl		2,07	f	0,19	88,6	
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	6,90		ijkl		2,24	ef	0,16	117,2	
21	Silicato Mg	2	6,79		ijkl		1,85	f	0,18	110,8	
22	Silicato Mg	4	6,59		jkl		1,92	f	0,23	150,6	
23	Silicato Mg	6	7,46		ijkl		2,01	f	0,12	97,5	
24	Cal líquida	8*	8,22		fghijk		1,71	f	0,20	162,2	
25	Cal líquida	12*	8,31		efghij		1,84	f	0,24	94,8	
26	Cal líquida	16*	9,49		defgh		1,67	f	0,26	95,5	
27	testigo	0	6,59		jkl		1,97	f	0,22	123,8	
<i>Pr>F</i>			<0,0001			<0,0001		0,6451	0,0624		
<i>diferencia minima significativa test Tukey</i>			1,9282			0,7876		0,3155	128,050		

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹

Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con p <0,001.



Las dosis de la enmienda líquida corresponden a 0 l.ha⁻¹, 8 l.ha⁻¹, 12 l.ha⁻¹ y 16 l.ha⁻¹

Figure 23. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de S en plantas de banano 12 semanas después de la siembra.

Cuadro 7. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en el contenido de micronutrientes del suelo 12 semanas después de la siembra.

Tratamiento	Fuente	ton.ha ⁻¹	(mg.l ⁻¹)						
			Fe	Cu	Zn	Mn			
1	CaCO ₃	2	336,4	abcde	13,0	abc	5,24	8,6	ab
2	CaCO ₃	4	370,4	abc	12,8	abc	5,44	10,2	ab
3	CaCO ₃	6	353,2	abcde	13,0	abc	4,88	7,6	ab
4	CaCO ₃	8	335,2	abcde	12,4	abc	4,36	6,8	b
5	CaCO ₃ 170	2	353,8	abcde	12,8	abc	5,72	11,2	a
6	CaCO ₃ 170	4	321,3	cde	13,5	abc	5,60	8,5	ab
7	CaCO ₃ 170	6	310,4	de	13,8	ab	5,88	8,4	ab
8	CaCO ₃ 170	8	305,3	e	12,8	abc	4,33	6,8	b
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	355,6	abcde	12,6	abc	4,72	9,0	ab
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	372,0	abc	12,4	abc	4,52	7,4	ab
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	374,8	ab	13,0	abc	4,78	7,2	ab
12	dolomita calcinada	2	376,4	ab	12,4	abc	4,32	7,8	ab
13	dolomita calcinada	4	366,8	abc	12,6	abc	4,18	7,8	ab
14	dolomita calcinada	6	363,0	abcd	13,0	abc	4,40	8,0	ab
15	dolom + dolom calcinada	2	346,8	abcde	12,3	ab	4,43	7,3	ab
16	dolom + dolom calcinada	4	350,4	abcde	12,6	abc	4,52	7,2	ab
17	dolom + dolom calcinada	6	324,5	bcde	14,0	a	4,35	6,8	ab
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	342,6	abcde	11,8	c	3,90	9,4	ab
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	359,6	abcd	12,0	bc	4,04	10,0	ab
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	383,4	a	12,2	abc	4,04	9,8	ab
21	Silicato Mg	2	375,2	ab	12,6	abc	4,48	9,2	ab
22	Silicato Mg	4	371,6	abc	12,6	abc	4,64	9,4	ab
23	Silicato Mg	6	345,5	abcde	13,0	abc	5,33	9,5	ab
24	Cal líquida	8*	374,8	ab	12,0	bc	3,74	8,6	ab
25	Cal líquida	12*	343,4	abcde	12,2	abc	4,10	8,8	ab
26	Cal líquida	16*	324,0	bcde	11,8	c	3,58	7,0	ab
27	testigo	0	369,1	abc	13,0	abc	5,33	11,1	a
<i>Pr>F</i>			<0,0001		0,0026		0,0038	<0,0001	
<i>diferencia minima significativa test Tukey</i>			52,9630		1,9482		2,3525	4,0233	

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹

Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con $p < 0,001$.

Cuadro 8. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de macronutrientes en las plantas 12 semanas después de la siembra.

Tratamiento	Fuente	ton.ha ⁻¹	(g.planta ⁻¹)											
			N		P		K		Ca		Mg		S	
1	CaCO ₃	2	0,29	abcd	0,05	abc	0,94	ab	0,25	ab	0,11	cdef	0,04	ab
2	CaCO ₃	4	0,25	cd	0,05	abcde	0,79	ab	0,20	abcd	0,10	ef	0,03	abcde
3	CaCO ₃	6	0,27	abcd	0,04	cde	0,76	ab	0,22	abcd	0,10	ef	0,03	cde
4	CaCO ₃	8	0,22	d	0,03	€	0,73	ab	0,20	abcd	0,09	f	0,02	€
5	CaCO ₃ 170	2	0,28	abcd	0,04	abcde	0,75	ab	0,23	abcd	0,10	ef	0,04	abcde
6	CaCO ₃ 170	4	0,25	bcd	0,04	cde	0,71	ab	0,22	abcd	0,10	ef	0,03	abcde
7	CaCO ₃ 170	6	0,25	abcd	0,05	abcde	0,81	ab	0,22	abcd	0,13	bcdef	0,03	abcde
8	CaCO ₃ 170	8	0,23	d	0,03	de	0,70	ab	0,20	abcd	0,10	ef	0,03	de
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	0,30	abcd	0,04	abcde	0,79	ab	0,23	abcd	0,11	def	0,03	abcde
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	0,29	abcd	0,05	abcde	0,85	ab	0,20	abcd	0,13	bcdef	0,04	a
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	0,26	abcd	0,05	abcde	0,85	ab	0,20	abcd	0,16	abcd	0,03	abcde
12	dolomita calcinada	2	0,28	abcd	0,04	bcde	0,77	ab	0,18	bcd	0,14	bcde	0,03	abcde
13	dolomita calcinada	4	0,24	d	0,04	abcde	0,74	ab	0,14	d	0,16	abc	0,03	abcde
14	dolomita calcinada	6	0,25	cd	0,05	abcd	0,85	ab	0,15	cd	0,20	a	0,03	abcde
15	dolom + dolom calcinada	2	0,26	abcd	0,04	abcde	0,80	ab	0,17	bcd	0,12	bcdef	0,03	abcde
16	dolom + dolom calcinada	4	0,30	abcd	0,05	abcde	0,84	ab	0,20	abcd	0,17	ab	0,04	abc
17	dolom + dolom calcinada	6	0,26	abcd	0,05	abcde	0,83	ab	0,18	bcd	0,16	ab	0,03	abcde
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	0,25	abcd	0,04	abcde	0,79	ab	0,16	bcd	0,09	†	0,03	abcde
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	0,28	abcd	0,04	bcde	0,75	ab	0,16	bcd	0,09	†	0,03	abcde
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	0,28	abcd	0,04	abcde	0,79	ab	0,19	abcd	0,11	def	0,04	abcde
21	Silicato Mg	2	0,27	abcd	0,04	abcde	0,84	ab	0,20	abcd	0,09	ef	0,03	abcde
22	Silicato Mg	4	0,32	abcd	0,06	a	1,00	a	0,21	abcd	0,10	ef	0,04	ab
23	Silicato Mg	6	0,26	abcd	0,05	ab	0,83	ab	0,22	abcd	0,12	bcdef	0,03	abcde
24	Cal líquida	8*	0,36	ab	0,04	bcde	0,80	ab	0,24	abc	0,09	ef	0,04	abcde
25	Cal líquida	12*	0,36	abc	0,03	€	0,69	b	0,25	ab	0,08	†	0,03	abcde
26	Cal líquida	16*	0,37	a	0,04	abcde	0,66	ab	0,28	a	0,10	ef	0,03	abcde
27	testigo	0	0,27	abcd	0,04	abcde	0,81	ab	0,21	abcd	0,09	ef	0,03	abcde
<i>Pr>F</i>			<0,0001		<0,0001		0,1109		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
<i>diferencia mínima significativa test Tukey</i>			0,1146		0,0179		0,3425		0,0938		0,0500		0,0129	

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹

Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con p <0,001.

Cuadro 9. Efecto de la dosis y fuente de enmienda en la absorción de micronutrientes en las plantas 12 semanas después de la siembra.

Tratamiento	Fuente	ton.ha ⁻¹	(mg.planta ⁻¹)									
			Fe		Cu		Zn		Mn		B	
1	CaCO ₃	2	47,00	ab	0,34	abc	1,45	abcd	7,91	def	0,94	abc
2	CaCO ₃	4	22,50	de	0,25	abc	0,94	def	3,70	ghi	0,87	abc
3	CaCO ₃	6	19,29	ε	0,21	bc	0,78	ef	2,36		0,77	c
4	CaCO ₃	8	19,64	ε	0,20	c	0,60	f	2,16		0,80	bc
5	CaCO ₃ 170	2	34,70	abcde	0,29	abc	1,77	ab	6,14	efgh	1,21	abc
6	CaCO ₃ 170	4	29,97	bcde	0,26	abc	1,11	cdef	3,50	ghi	1,11	abc
7	CaCO ₃ 170	6	55,72	a	0,38	a	1,25	abcde	2,79	†	1,13	abc
8	CaCO ₃ 170	8	33,93	bcde	0,25	abc	0,80	ef	2,14		0,96	abc
9	Dolomita + yeso + óxidos	2	29,62	bcde	0,30	abc	1,00	cdef	7,93	def	1,22	abc
10	Dolomita + yeso + óxidos	4	25,04	cde	0,28	abc	0,97	cdef	4,97	efghi	1,24	abc
11	Dolomita + yeso + óxidos	6	34,58	bcde	0,32	abc	1,00	cdef	3,51	ghi	1,18	abc
12	dolomita calcinada	2	29,24	bcde	0,29	abc	0,98	cdef	6,33	efg	1,06	abc
13	dolomita calcinada	4	36,95	abcde	0,28	abc	0,86	def	2,85	hi	1,17	abc
14	dolomita calcinada	6	41,30	abcde	0,31	abc	0,91	def	2,56		1,06	abc
15	dolom + dolom calcinada	2	20,53	de	0,25	abc	0,93	def	6,07	efgh	1,03	abc
16	dolom + dolom calcinada	4	34,07	bcde	0,31	abc	1,86	a	4,03	g†	1,08	abc
17	dolom + dolom calcinada	6	37,37	abcde	0,32	abc	0,84	def	4,19	g†	0,93	abc
18	Roca fosfórica + silicato Mg	2	23,42	cde	0,26	abc	1,57	abc	11,49	abc	1,00	abc
19	Roca fosfórica + silicato Mg	4	25,08	cde	0,24	abc	0,83	def	10,00	abcd	0,93	abc
20	Roca fosfórica + silicato Mg	6	40,03	abcde	0,33	abc	1,13	cdef	11,32	abcd	1,07	abc
21	Silicato Mg	2	29,02	bcde	0,31	abc	0,96	cdef	12,01	ab	1,13	abc
22	Silicato Mg	4	32,15	bcde	0,37	a	1,36	abcde	13,21	a	1,28	a
23	Silicato Mg	6	44,18	abc	0,36	ab	1,20	bcdef	12,48	ab	1,25	ab
24	Cal líquida	8*	30,68	bcde	0,33	abc	1,15	bcdef	10,29	abcd	1,15	abc
25	Cal líquida	12*	30,46	bcde	0,31	abc	1,16	bcdef	8,40	cdef	1,00	abc
26	Cal líquida	16*	34,28	bcde	0,35	abc	1,15	bcdef	9,06	bcde	1,18	abc
27	testigo	0	38,39	abcde	0,34	abc	1,25	abcde	11,60	abc	1,22	abc
<i>Pr>F</i>			<0,0001		0,0002		<0,0001		<0,0001		0,0002	
<i>diferencia minima significativa test Tukey</i>			21,1230		0,1557		0,6319		3,4559		0,4740	

* Las dosis de la enmienda líquida corresponden a l.ha⁻¹

Valores con la misma letra no difieren significativamente entre sí con p <0,001.