

Toxicidad por aluminio (Al^{3+}) como limitante del crecimiento y la productividad: experiencias en diagnóstico y manejo en Palmeras de Yarima S. A. (Santander)

Aluminum Toxicity (Al^{3+}) as a Limitation of Growth and Productivity: Diagnosis and Management Experience of Palmeras de Yarima S. A. (Santander)

CITACIÓN: Díaz-Durán, M. Á., Ochoa, C. A., Álvarez, J. W. & Rincón-Numpaque, Á. H. (2022). Toxicidad por aluminio (Al^{3+}) como limitante del crecimiento y la productividad: experiencias en diagnóstico y manejo en Palmeras de Yarima S. A. (Santander). *Palmas*, 43(1), 102-116.

PALABRAS CLAVE: Acidez, Saturación de Aluminio, Enmiendas, Bolsas de muestreo.

KEYWORDS: Acidity, Aluminum Saturation, Amendments, Sampling bags.

DÍAZ DURÁN MIGUEL ÁNGEL

I. A. Director Agronómico de Palmeras de Yarima S. A.
agronomico@palmerasdeyarima.com.co

OCHOA CARLOS ARTURO

I. A. Profesional de Apoyo Agronómico, Palmeras de Yarima S. A.

ÁLVAREZ JHON WILMAR

Agr. Líder Sanidad Vegetal, Palmeras de Yarima S. A.

RINCÓN NUMPAQUE ÁLVARO HERNÁN

I. A. Asistente de Investigación Programa Agronomía de Cenipalma

Resumen

Los suelos establecidos con palma de aceite en la Zona Central palmera de Colombia presentan condiciones extremas de acidez que limitan el desarrollo del cultivo, con repercusiones negativas en los rendimientos. Con el propósito de evaluar el efecto de la acidez y su manejo en la productividad del cultivo, en la plantación Palmeras de Yarima S. A. se implementó un plan de manejo de enmiendas enfocado en el mejoramiento de la fertilidad de los suelos. Este, incluyó la implementación de pruebas de reactividad de enmiendas, la selección de fuentes y dosis adecuadas y el seguimiento a escala comercial de propiedades químicas y de producción. Como resultado, se obtuvieron efectos positivos de las combinaciones de enmiendas aplicadas en la reducción de la saturación de aluminio a niveles permisibles ($<30\%$), aumento de la saturación de Ca y Mg a niveles adecuados (40% y 20% respectivamente) y aumento de los contenidos de P disponible ($>20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Estas pruebas permitieron validar el uso de la técnica

ca de bolsas de muestreo y el uso de la biomasa radical como indicador biológico de respuesta en pruebas de reactividad de enmiendas (PRE) en campo a corto plazo. Los resultados se complementaron con la evaluación de costos de las fuentes y las respuestas obtenidas por la aplicación del plan de manejo de enmiendas después de cuatro años de implementación.

Abstract

Oil palm crops are planted in acid soils with high aluminum contents in the Central Zone of Colombia. This condition reduces the crop development and its productivity. To evaluate the soil acidity management on the crop yields, Palmeras the Yarima carried out an amendments management strategy, which includes a reactivity test, amendments selection, application rates, chemical properties evaluation and their association with yields. Amendments application in reactivity tests showed a reduction of aluminum saturation and increase Ca, Mg and P contents in soils. On the other hand, sampling bags method and roots dry weight was validated as a biological indicator of amendment effects in the short term. Finally, amendments costs and their yield responses were evaluated four years after application in commercial plots.

Introducción

Para lograr una producción agrícola competitiva y sostenible es necesario tener en cuenta todos los factores que afectan la productividad. Dentro de estos el suelo juega un papel fundamental. En Colombia los suelos son predominantemente ácidos con pH menores de 5,5 (Malagón, 2003). Según Osorno (2012), este tipo de suelos representa el 80 % del área del país que requiere un adecuado manejo de sus propiedades químicas. Por las condiciones de mercado y de competitividad económica, el manejo técnico de la fertilización y corrección de los desequilibrios químicos en los diferentes suelos ácidos toman mayor relevancia, aun más, cuando estamos ubicados en una zona tropical, con altas precipitaciones, que facilitan la lixiviación de las bases e incrementan la acidez del suelo (Osorno, 2012).

El aluminio soluble (Al^{3+}) es el factor más limitante para el crecimiento y la producción de los cultivos en suelos ácidos (Tang *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2005; Liao *et al.*, 2006; Cristancho *et al.*, 2010), lo que conlleva a la disminución de la solubilidad del fósforo y del molibdeno, y al descenso de la concentración de macronutrientes en la solución del suelo (Rout *et al.*, 2001). En la planta, causa una alteración del metabolismo general e inhibe el crecimiento radical, afectando la toma de agua y nutrientes. Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de las propie-

dades fisicoquímicas del suelo y de la tolerancia de las especies vegetales (Agamuthu y Broughton, 1986; Ma *et al.*, 2001; Barceló y Poschenrieder, 2002).

La palma de aceite no es ajena a esta realidad. En la actualidad el cultivo se está expandiendo en Colombia y las zonas tropicales del mundo, donde las condiciones de suelos son predominantemente ácidas, con bajos contenidos de fósforo y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}) y alta saturación de aluminio (Arias y Munévar, 2004). Es así como se encuentra que los suelos más representativos en tres de las cuatro zonas palmeras del país presentan condiciones de extrema acidez, con pH <4,5 y saturaciones de aluminio superiores a 60 % (Munévar, 1998).

En la Zona Central, la plantación Palmeras de Yarima S. A. ha puesto su interés en el manejo de esta problemática, debido a que 83 % de su área de cultivo presenta saturaciones de aluminio superiores a 30 %, consideradas como restrictivas para el crecimiento y productividad de la palma de aceite. Por esta razón, ha trabajado en el diseño e implementación de un plan de manejo de la acidez del suelo, basado en el diagnóstico de sus propiedades químicas y la prescripción y aplicación de enmiendas, partiendo de pruebas de reactividad.

En este contexto, el trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres combinaciones de enmiendas en suelos ácidos de la Zona Central, realizando pruebas de reactividad de enmiendas en campo median-

te la técnica de las bolsas de muestreo. Esta ha sido descrita por Böhm (1979) y utilizada por Albertazzi (2009) para evaluar el efecto de prácticas agronómicas en la dinámica del sistema radical de la palma de aceite. Adicionalmente, estas pruebas se implementaron para valorar el efecto de las enmiendas en las condiciones ambientales de la plantación y validar las respuestas en biomasa radical como un indicador biológico del mejoramiento del suelo a corto plazo. Por otra parte, en este estudio se recopilan los resultados del plan de manejo de enmiendas a escala comercial y sus efectos en la productividad del cultivo, con el fin de presentar a los palmicultores los beneficios de esta práctica y su potencial en el manejo sostenible del cultivo.

Metodología

Ubicación

El estudio se realizó en la plantación Palmeras de Yarima S. A. ubicada en el corregimiento de Yarima del

municipio de San Vicente de Chucurí (Santander) (Figura 1). La plantación se encuentra a 170 m s. n. m., con una temperatura promedio de 29 °C, humedad relativa 88 % y una pluviosidad que oscila entre los 2.200 a 2.600 mm año. El estudio detallado de suelos de la plantación permitió establecer que 83 % del área de la plantación cuenta con suelos ácidos, con saturaciones de aluminio superiores a 30 %. Dichos valores son restrictivos para el desarrollo y producción de la palma. Considerando lo anterior, para la implementación de las pruebas de reactividad se seleccionó un lote dentro de la consociación de suelos las Verrugas, cuyas características químicas se resumen en la Tabla 1.

En general, esta consociación se caracteriza por sus condiciones de extrema acidez (pH<4,5) y baja fertilidad, con saturaciones de aluminio superiores a 80 %. Adicionalmente presentan bajos contenidos de calcio, potasio y magnesio, así como de fósforo disponible (<10mg*kg⁻¹). El lote está sembrado con un cultivar de palma *Elaeis guineensis*, cruzamiento Deli x La Mé) de 10 años.

Figura 1. Localización de la plantación y el lote experimental

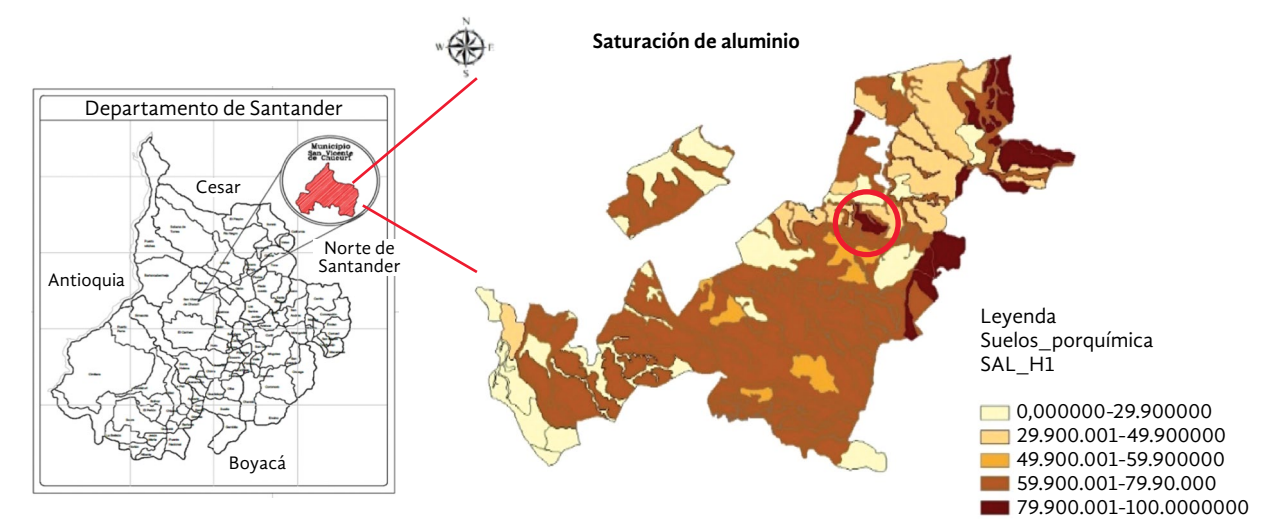


Tabla 1. Condición química inicial del suelo.

Textura	MO	pH	P	CICE	Bases	K	Ca	Mg	Na	Al	Ca:Mg	(Ca+Mg)/K
	%		mg/kg	cmol(+)/kg	Saturación (%)							
Franca	1,70	4,02	3,48	2,86	16,07	1,75	6,29	6,64	1,40	83,93	0,95	7,40

Establecimiento de pruebas de reactividad de enmiendas en campo

Se implementaron tres pruebas de reactividad de enmiendas (PRE) en campo, en las cuales se evaluaron tres combinaciones de enmiendas en tres dosis de aplicación calculadas para obtener diferentes niveles de saturación teórica de aluminio. Se incluyó adicionalmente un tratamiento testigo sin aplicación de enmiendas en cada PRE. Las enmiendas para realizar estas pruebas fueron seleccionadas de acuerdo con las características químicas del suelo problema, enfocando dicha selección a la reducción de los niveles de aluminio, el mejoramiento del balance de bases y el aumento de los contenidos de fósforo disponible. La Tabla 2 muestra las fuentes seleccionadas y los niveles de aluminio teórico contemplados.

Las dosis teóricas de enmiendas fueron establecidas teniendo en cuenta el porcentaje de aluminio deseado descrito por Molina (1998), mediante la siguiente ecuación:

$$t * ha^{-1} CaCO_3 = \frac{1,5(Al - RAS) * CICE}{100}$$

$$t * ha^{-1} enmienda comercial = t * ha^{-1} CaCO_3 * \frac{100}{PRNT}$$

donde:

Al: saturación de aluminio actual (%).

RAS: saturación de aluminio deseada (%).

CICE: capacidad de intercambio catiónica efectiva (cmol (+)*kg⁻¹)

PRNT: poder relativo de neutralización total de la enmienda (%).

Con los cálculos base se definieron las siguientes dosis de aplicación y las relaciones de enmiendas a utilizar para lograr los efectos deseados (Tabla 3).

Con estas combinaciones de enmiendas se establecieron las PRE en campo, utilizando la técnica de

Tabla 2. Combinaciones de enmiendas utilizadas y niveles de saturación de aluminio deseados.

Prueba	Combinaciones de enmiendas	Niveles sat. aluminio deseado
1	Dolomita + APR	83 % - 55 % - 30 % - 0 %
2	Dolomita+ RP	83 % - 55 % - 30 % - 0 %
3	Dolomita + Yeso + MgO + RF	83 % - 55 % - 30 % - 0 %

Tabla 3. Cantidades de enmiendas requeridas para obtener diferentes niveles de saturación de aluminio en los suelos de estudio.

Pruebas de reactividad	Combinaciones	Porcentaje de la mezcla						
		Sat. Al deseada	Enmienda (T/Ha)	Dolomita	Roca fosfórica	APR	Yeso	MgO
PRE 1	Dol + APR	0%	4,00	70	-	30		
		30%	2,50	70	-	30		
		55%	1,33	70	-	30		
PRE 2	Dol + RP	0%	4,00	85	15			
		30%	2,50	85	15			
		55%	1,33	85	15			
PRE 3	Dol + Yeso + MgO + RP	0%	4,00	55	15	-	20	10
		30%	2,50	55	15	-	20	10
		55%	1,33	55	15	-	20	10

las bolsas de muestreo descrita por Böhm (1979) y Albertazzi (2009), la cual consiste en ubicar sacos de lenta degradación (malla de polisombra) con diferentes tratamientos aplicados al suelo problema para evaluar en el tiempo la respuesta en crecimiento de raíces a diferentes prácticas de manejo. Para efectos de las PRE, en cada palma se aplicaron las enmiendas seleccionadas al suelo en las dosis calculadas para los tres niveles de saturación de Al^{3+} deseado más un testigo sin aplicación de enmienda. De este modo, cada grupo de cuatro plantas constituyó un experimento cuyos tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones (Figura 2).

La unidad experimental fue una bolsa de muestreo llena con suelo y mezclada homogéneamente con las dosis de las enmiendas calculadas. Para la implementación de los tratamientos se realizaron 4 cajuelas de 30 cm x 30 cm x 30 cm a una distancia de 2 m del estípite de cada palma. El suelo extraído fue desmenuzado y se le retiraron las raíces, rocas y demás materiales ajenos a este. Posteriormente se determinó el contenido de humedad y se incorporaron y homogenizaron las dosis calculadas a 20 kg de suelo seco, los cuales se introdujeron en sus respectivas bolsas. Se metieron las bolsas en las cajuelas, cubriéndolas con una capa de suelo adicional y marcando su ubicación. Se dejó que las bolsas así dispuestas reaccionaran por 6 meses, al cabo de los cuales se retiraron y se extrajeron las raíces para su clasificación y medición. La Figura 3 ilustra el procedimiento de montaje de las pruebas en campo.

Se dejó que reaccionaran por 6 meses las pruebas de reactividad establecidas, al cabo de los cuales se extrajeron las bolsas. Se tomaron muestras del suelo dentro de cada bolsa, y se realizaron análisis químicos completos con el fin de evaluar el efecto de las enmiendas en las propiedades químicas del suelo. Como indicador biológico de respuesta, se extrajo el sistema radical generado durante el tiempo de las pruebas, el cual fue lavado y clasificado según los criterios definidos por Jourdan *et al.* (2005) (Tabla 4). Una vez clasificadas, las raíces fueron secadas en horno a 60 °C durante 48 horas y pesadas.

Los resultados obtenidos de los análisis de suelos y el peso seco de raíces fueron analizados mediante pruebas de estadística descriptiva, análisis de varianza y de comparación de medias de Tukey, mediante el programa estadístico RStudio.

Evaluación del plan de manejo de la acidez a nivel comercial

Adicional a las pruebas de reactividad se documentaron los resultados obtenidos de la aplicación de enmiendas a escala comercial en la plantación. Las aplicaciones comerciales se realizaron dentro de un plan de manejo que involucra la acidez del suelo como la mayor limitante para el cultivo y cuya implementación se ha realizado durante los últimos cuatro años.

En este caso las necesidades de encalamiento fueron establecidas a partir de pruebas de reactividad de

Figura 2. Distribución de los tratamientos

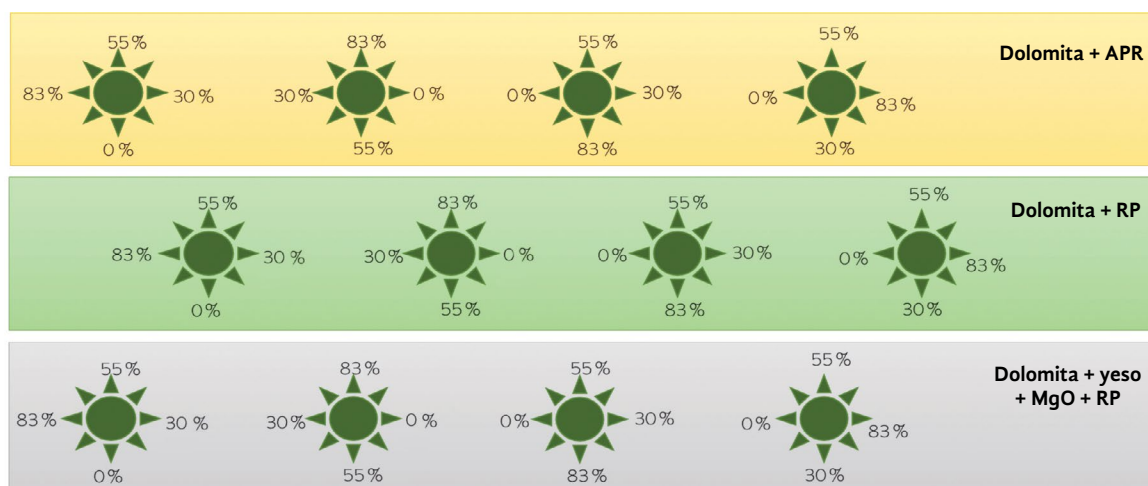


Figura 3. Montaje en campo de la prueba



Tabla 4. Clasificación de raíces (adaptado de Jourdan *et al.*, 2005).

Clasificación	Tipo de raíz	Diámetro (mm)
Gruesas	Primarias	5 a 10
	Secundarias	1 a 5
Finas	Terciarias	0,5 a 1
	Cuaternarias	<0,5

enmiendas (PRE) en los suelos más representativos de la plantación. Con esta información se diseñó un plan de manejo acorde a las necesidades de cada lote, el cual fue distribuido en un plazo de cuatro años priorizando las áreas con los mayores problemas de acidez. Para establecer los beneficios del plan de manejo de enmiendas se evaluaron las propiedades químicas del suelo antes de la aplicación y a los cuatro años después de implementado dicho plan. Estos resultados fueron comparados con los incrementos en producción de racimos de fruta fresca por hectárea.

Resultados y discusión

Efecto de las enmiendas en la acidez y el balance de bases

El uso de las diferentes combinaciones de enmiendas permitió reducir efectivamente las saturaciones de aluminio a niveles adecuados para la palma de aceite (<30 %) e incrementar sus contenidos de calcio

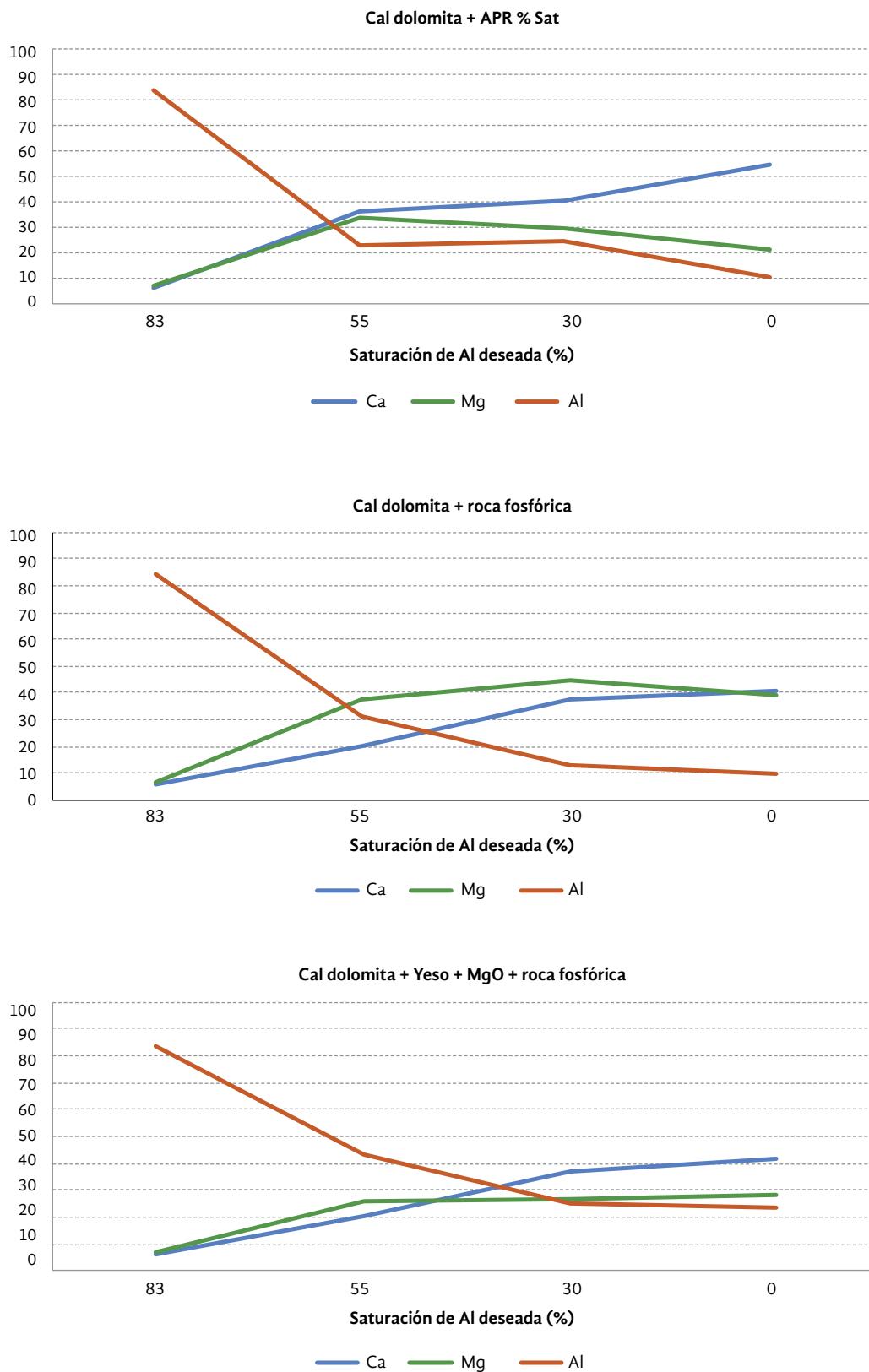
y magnesio. Las tres pruebas de reactividad mostraron una alta eficiencia de las enmiendas aplicadas, alcanzando los niveles adecuados de saturación de aluminio desde las dosis más bajas de aplicación, que fueron calculadas para una saturación deseada del 55 %. A medida que se incrementaron las dosis, las saturaciones de aluminio se redujeron hasta niveles entre el 10 y 20 %.

Así mismo, las 3 combinaciones de enmiendas incrementaron los contenidos de calcio y magnesio en el suelo, llevando su saturación desde niveles <10 % hasta valores comprendidos entre 40 y 60 % para el calcio y, entre 20 y 40 %, para el magnesio con las dosis máximas de aplicación (dosis teórica para reducir la saturación de aluminio a 0 %) (Figura 4).

Efecto de las combinaciones de enmiendas en los contenidos de fósforo

El fósforo es un elemento requerido por la palma de aceite por su papel en la formación de ácidos nucleicos

Figura 4. Combinación cal dolomita + APR en relación con la saturación de calcio, magnesio y aluminio



y la transferencia de información genética, así como por la producción de fosfolípidos en las membranas celulares y su papel en los procesos de transferencia de energía de la planta, al ser constituyente esencial de la molécula de ATP. De esta manera, este elemento es de vital importancia en la producción de biomasa vegetativa, al favorecer la emisión foliar e incrementar el peso medio de racimos, contribuyendo al aumento de los rendimientos (Goh y Hardter, 2003). Este elemento se encuentra en bajas concentraciones en los suelos ácidos de la plantación y es altamente fijado en condiciones de alta saturación de aluminio. Las tres combinaciones de enmiendas implementadas permitieron incrementar los contenidos de fósforo disponible en el suelo gradualmente a medida que se elevaron las dosis aplicadas, llevándolos a valores adecuados para el cultivo de la palma ($>20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Este efecto se logró debido los aportes del elemento, realizados por la roca fosfórica (RP) y las escorias

Thomas (APR), además de su solubilización al reducir los niveles de aluminio y aumentar el pH (Figura 5).

Efectos de la combinación de enmiendas sobre el pH del suelo

El pH es uno de los principales parámetros a considerar en el diagnóstico y manejo de la acidez del suelo. Los que fueron evaluados presentan pH extremadamente ácidos en sus condiciones originales ($<4,5$). La aplicación de las diferentes enmiendas presentó efectos positivos en el pH, incrementándolo desde 4 en el suelo sin enmendar hasta niveles de 4,6 a 5. Estos cambios influyen de manera positiva en la disponibilidad de fósforo nativo, al favorecer su liberación a partir de compuestos insolubles de hierro y aluminio generados en las condiciones de la zona de estudio (Castro y Sánchez, 2010) (Figura 6).

Figura 5. Efecto de las enmiendas en los contenidos de fósforo disponible en el suelo

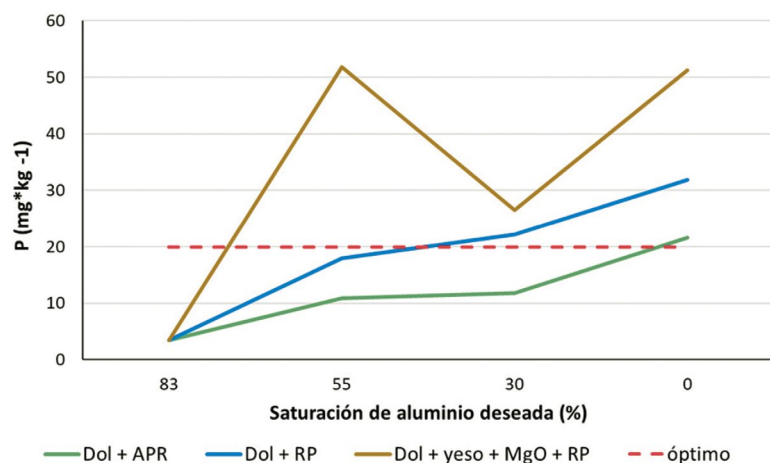
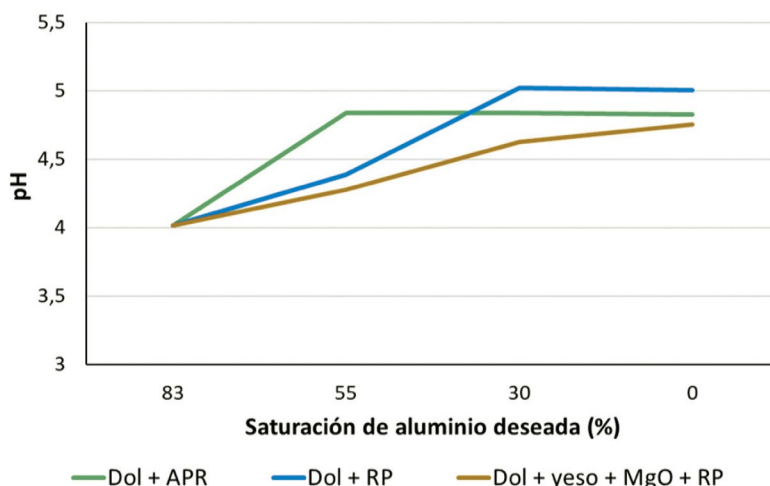


Figura 6. Efecto de las enmiendas aplicadas en el pH del suelo



Efecto de las enmiendas sobre el balance de bases

Se observaron efectos positivos de las aplicaciones de enmiendas en el incremento de los contenidos de calcio y magnesio en el suelo. Dependiendo de la composición y la velocidad de la reacción de las enmiendas utilizadas, la relación Ca:Mg puede variar. Así, la combinación de cal dolomita + escoria Thomas (APR) presentó incrementos en la relación Ca:Mg, con valores máximos de 2,6 con las dosis más altas de aplicación. Esto se debe a que la escoria Thomas tiene 48 % de CaO y 6 % de MgO altamente reactivos, que bajo las condiciones de acidez del suelo tienen una reacción rápida liberando el Ca y Mg en corto tiempo. Por el contrario, el uso de cal dolomita + RP no presentó modificaciones en este parámetro, debido a que son fuentes de reacción lenta. La combinación de dolomita + yeso + MgO + RP mostró un incremento hasta de 1,5 unidades en la relación Ca:Mg a medida que disminuía la saturación de aluminio (Figura 7), debido a que en esta combinación se incluyen fuentes de alta reactividad con enmiendas de baja reactividad en el suelo, que presentan efectos graduales en la relación Ca:Mg.

Figura 7. Efecto de la aplicación de enmiendas en la relación Ca:Mg del suelo.

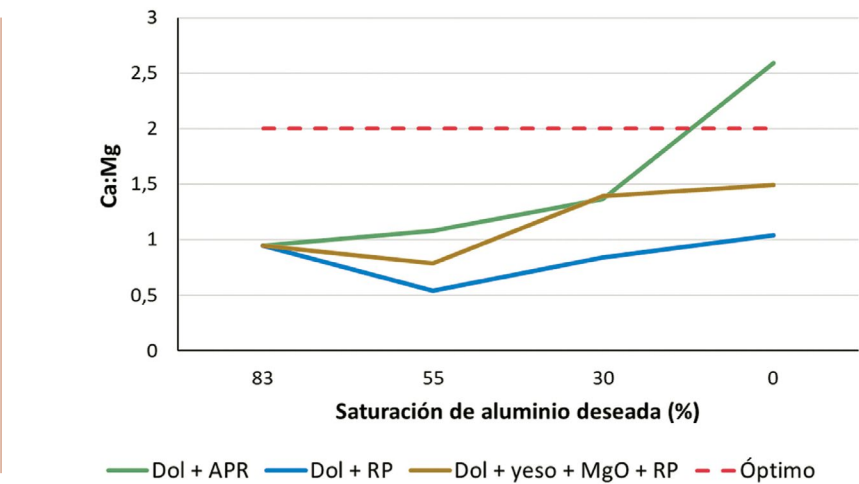


Tabla 5. Análisis de los cambios químicos inducidos por las combinaciones de enmiendas al suelo.

Enmiendas	Sat Al.	Sat Ca	Sat. Mg	P	pH	Ca/Mg
Dol + APR	+	+	+	+	+	+
Dol + RP	+	+	+	+	+	0
Dol + Yeso + MgO + RP	+	+	+	+	+	+

A manera de síntesis, la Tabla 5 presenta los cambios obtenidos en el suelo con la aplicación de las diferentes combinaciones de enmiendas en los seis meses de duración de las pruebas. De esta forma se confirma que las enmiendas seleccionadas técnicamente de acuerdo con las características químicas y su diagnóstico, permitieron obtener cambios positivos en el suelo, acordes con los objetivos que se plantearon inicialmente.

Efecto de la aplicación de enmiendas en la masa seca radical

Uno de los parámetros evaluados de mayor interés en cuanto a la búsqueda de un indicador biológico de corto plazo en las pruebas de reactividad de enmiendas fue la masa seca radical. En este sentido, se observó que con la aplicación de las combinaciones cal dolomita + APR y cal dolomita + RP, la biomasa radical se incrementó significativamente a medida que se redujeron las saturaciones de aluminio en el suelo. En la combinación de cal dolomita + yeso + MgO + RP estos incrementos no fueron evidentes, dándose únicamente en las dosis de aplicación más

altas. Estos resultados permiten confirmar que altas saturaciones de aluminio en el suelo pueden afectar negativamente el desarrollo radical de la palma de aceite con posibles efectos en la toma de agua y nutrientes por la planta. Así mismo, se pudo validar el uso del método de las bolsas de muestreo en pruebas de reactividad de enmiendas, con el beneficio adicional de incluir al sistema radical como indicador biológico de respuesta a corto plazo (Figura 8).

Valor económico de las propuestas de manejo de enmiendas

Los resultados obtenidos en las PRE permitieron observar que existe una gama amplia de opciones eficientes en el manejo de la acidez en las condiciones de Palmeras de Yarima S. A. La combinación de las fuentes y dosis aplicadas y sus efectos medidos en el suelo le permiten a la plantación incluir el factor económico en la selección de la mejor opción a aplicar en el futuro. En la Figura 9 se observa el resumen de los costos de cada una de las combinaciones de enmiendas y los niveles de saturación de aluminio deseado. Los costos estimados muestran valores significativamente diferentes entre las propuestas evaluadas. A pesar de esto, el uso de estas enmiendas se considera viable en las condiciones de la plantación, si se tiene en cuenta que se pueden realizar ajustes en las aplicaciones. Las modificaciones contempladas incluyen realizar la aplicación en áreas específicas de los lotes (interlíneas, calles de no tráfico) y la necesidad de incorporación de las enmiendas, donde la opción con yeso es atractiva debido a que se puede aplicar en superficie sin afectar los beneficios de la enmienda. Otra alternativa consiste en establecer el uso de cada enmienda de acuerdo con las UMAS de la plantación, considerando la topografía, la logística de aplicación y los niveles de saturación actual de aluminio, priorizando el uso de las enmiendas de diferente velocidad de reacción en las zonas de más alta saturación y las de menor reactividad en las zonas donde la saturación de aluminio se encuentre en niveles mas tolerables. Adicionalmente se puede incluir el área a impactar por cada nivel de saturación de aluminio actual, debido a que a mayor área se necesitará mayor cantidad de enmienda y el factor económico será más relevante en la selección de las enmiendas.

Figura 8. Respuesta de la biomasa radical a la aplicación de enmiendas en pruebas de reactividad de campo

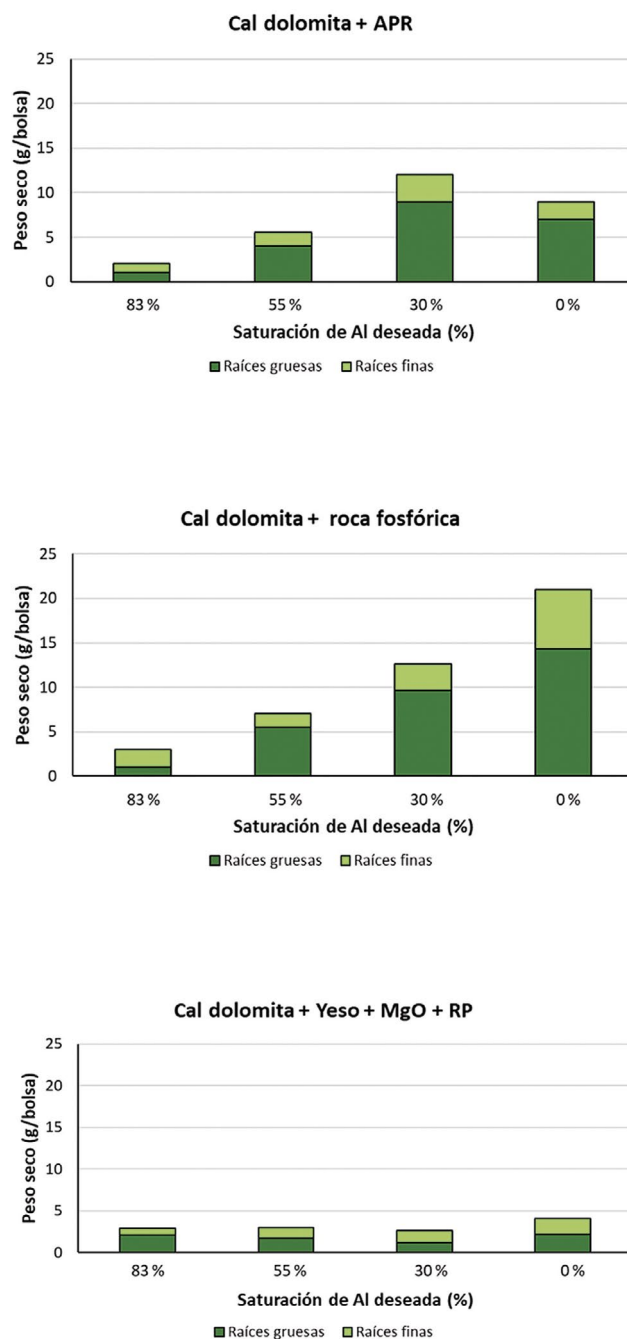
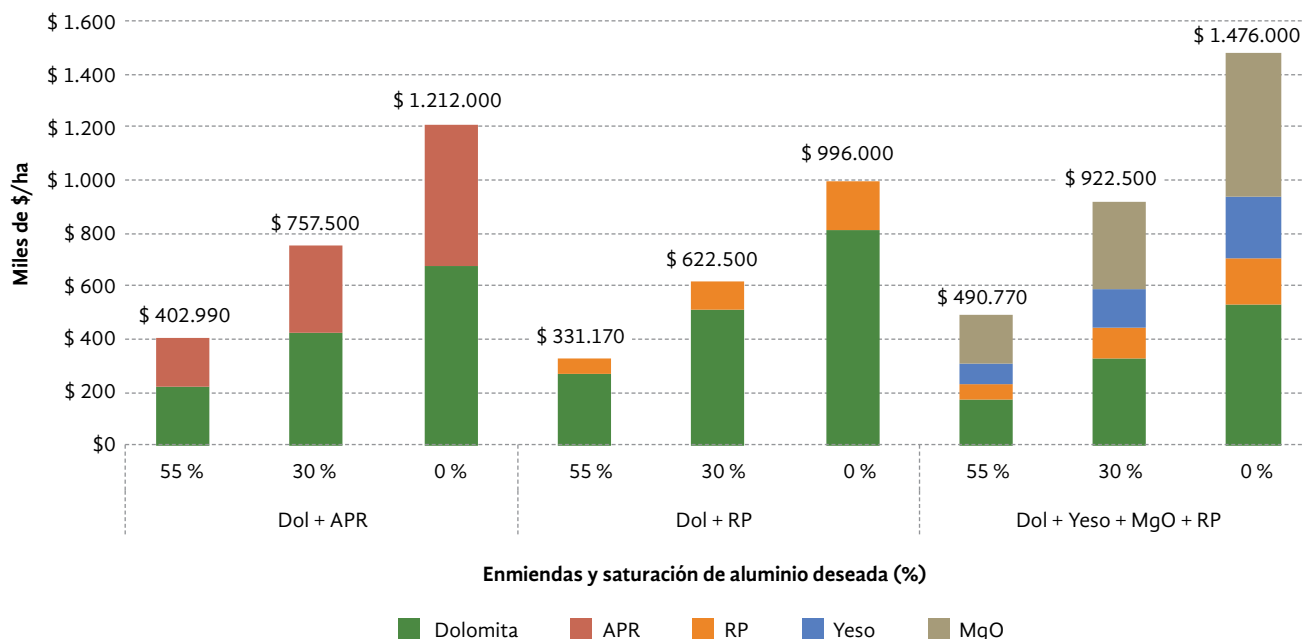


Figura 9. Costo de las enmiendas propuestas para cada nivel de saturación de aluminio deseado



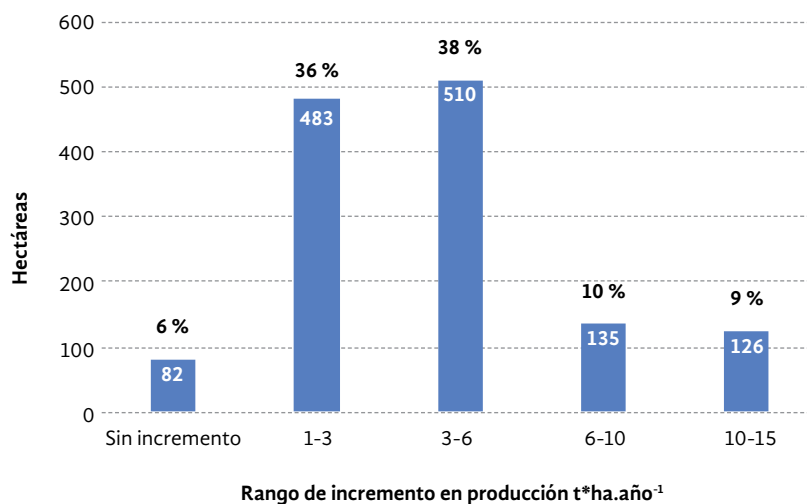
Efectos de la aplicación de enmiendas en los suelos y la producción a escala comercial

Paralelamente a las pruebas realizadas, en la plantación Palmeras de Yarima S. A. se ha implementado un plan de aplicación de enmiendas desde hace 4 años, en los cuales se han evidenciado cambios positivos en las propiedades químicas del suelo y la producción. Estas aplicaciones se han realizado en 1.336 hectáreas, de las cuales tan solo el 6 % no han mos-

trado incrementos en la producción. El 94 % restante aumentó de 1 hasta 15 t/ha*año como se muestra en la Figura 10.

Los lotes que no han presentado incrementos en la producción corresponden a áreas en las cuales la tecnología ha sido aplicada recientemente (<2 años de aplicación). Por lo tanto, los efectos de las enmiendas solo se han observado en las propiedades químicas del suelo, siendo evidente la reducción en las saturaciones de aluminio y el mejoramiento en el balance de bases y los contenidos de fósforo (Figura 11).

Figura 10. Incrementos en la producción de racimos de fruta fresca en áreas con manejo de enmiendas

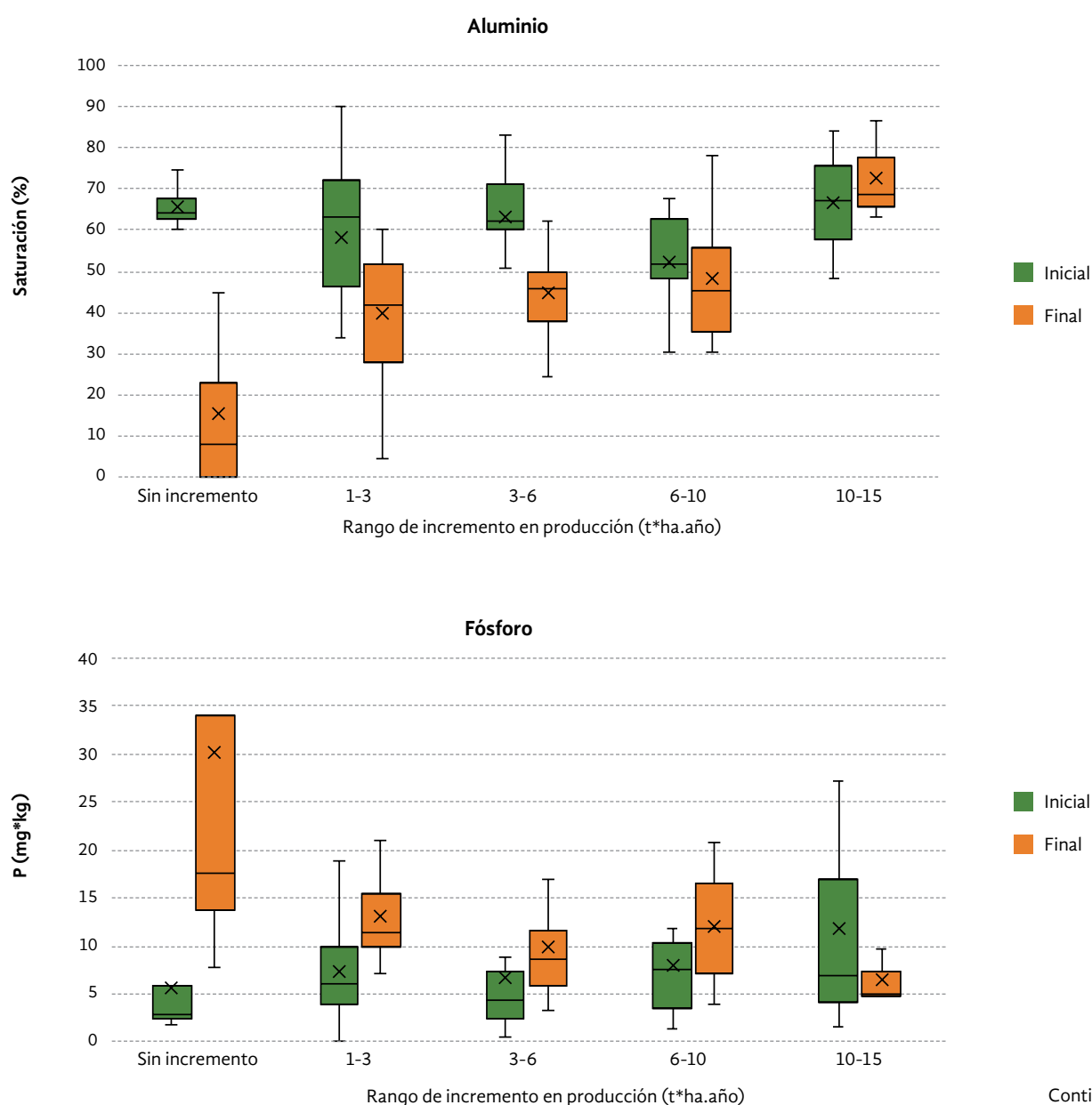


Por otra parte, en los lotes con incrementos en producción de 1 hasta 10 t*ha⁻¹, las aplicaciones se realizaron de 2 a 3 años atrás y, al igual que en el caso anterior, su efecto se observa en la reducción de las saturaciones de aluminio y el incremento en los contenidos de Ca, Mg y P después de este tiempo (Figura 11).

Los lotes con incrementos >10 t*ha⁻¹ fueron los primeros en ser intervenidos con las enmiendas 4 años atrás. Los resultados de los análisis de suelos

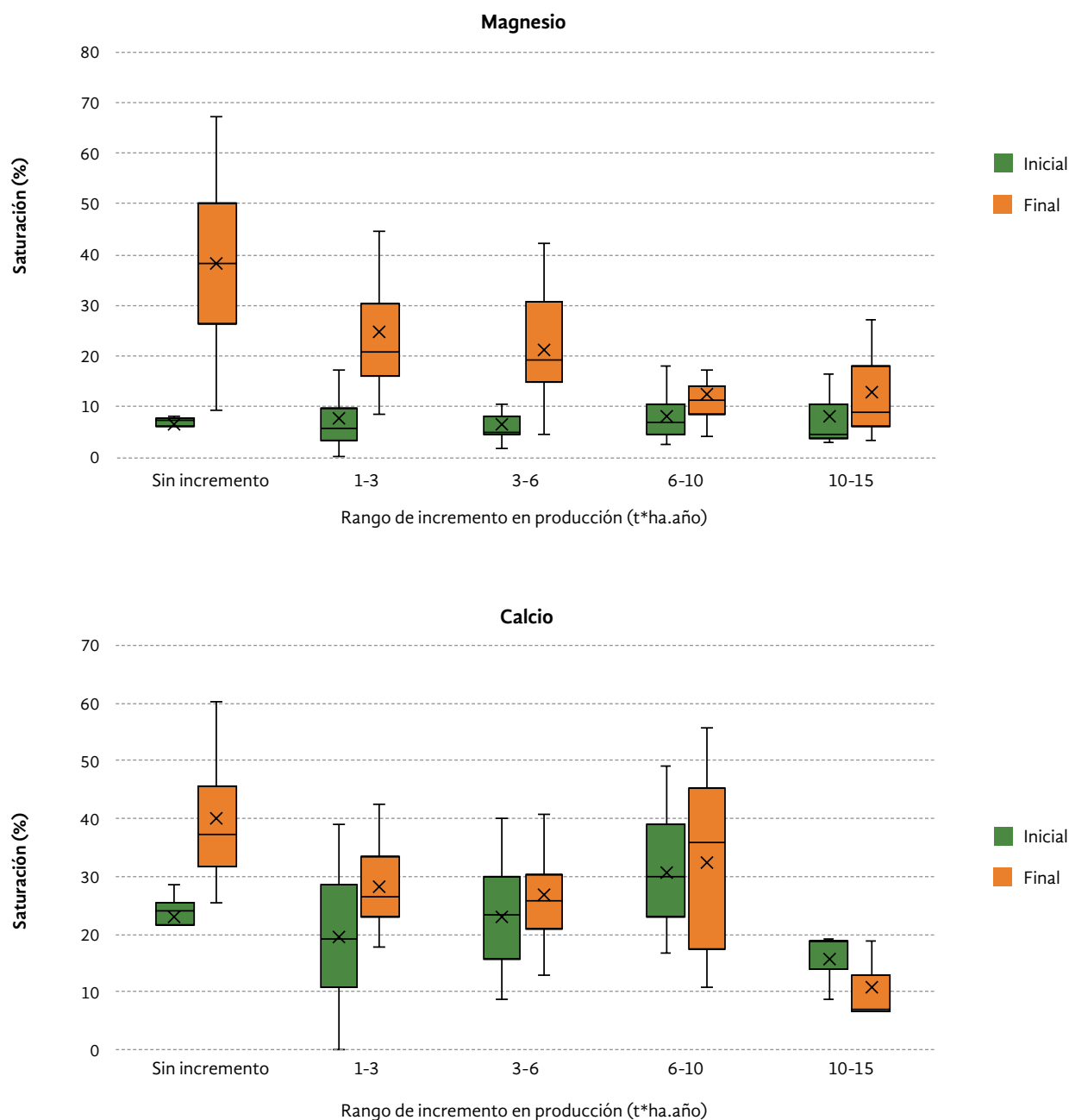
muestran que actualmente este volvió a su condición original, haciendo necesaria la aplicación de enmiendas nuevamente para que la producción se mantuviera en los niveles actuales. En general, la experiencia en el manejo de la acidez en la plantación Palmeras de Yarima S. A. ha sido positiva y ha permitido validar el mejoramiento de la fertilidad del suelo como factor determinante de la productividad en las condiciones de la Zona Central (Figura 11).

Figura 11. Cambios obtenidos en el suelo y su relación con la productividad por efecto de aplicaciones de enmiendas a escala comercial.



Continúa

Figura 11. Cambios obtenidos en el suelo y su relación con la productividad por efecto de aplicaciones de enmiendas a escala comercial.



Conclusiones

La experiencia obtenida por Palmeras de Yarima S. A. en el manejo de la acidez del suelo, basada en criterios técnicos de diagnóstico y recomendación de enmiendas permite concluir:

Las pruebas de reactividad de enmiendas mediante la metodología de bolsas de muestreo es una alternativa viable para la selección de fuentes y dosis adecuadas en condiciones de campo, que permite evaluar de manera integral los efectos de las enmiendas en el suelo y sus repercusiones en el sistema ra-

dical de la palma a corto plazo bajo las condiciones ambientales de la zona.

La combinación de enmiendas de diferente origen, composición y reactividad, hacen más efectivo el mejoramiento químico de suelos ácidos desaturados, presentándose efectos positivos en la reducción del aluminio intercambiable y el incremento de los contenidos de Ca, Mg y P en comparación con las condiciones iniciales del suelo.

A partir de las PRE realizadas con esta metodología se pueden seleccionar las fuentes y dosis ade-

cuadas a las condiciones específicas de la plantación, incluyendo aspectos técnicos y económicos.

La implementación del plan de manejo de la acidez mediante la aplicación de enmiendas en la plantación Palmeras de Yarima S. A. ha permitido el mejoramiento gradual de la fertilidad del suelo con repercusiones positivas en la productividad del cultivo. Por lo tanto, los esquemas de manejo que incluyan este tipo de tecnologías son viables y pueden aportar a la competitividad del cultivo dentro de un ambiente de sostenibilidad.

Bibliografía

- Agamuthu, P. & Broughton, W. J. (1986). Factors Affecting the Development of the Rooting System in Young Oil Palms (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 17, 173-179.
- Albertazzi, H., Chinchilla, C. & Ramírez, C. (2009). Dinámica del sistema radical de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en respuesta a la fertilización mineral y orgánica en suelos de áreas afectadas por Purdrición del cogollo. *ASD Oil Palm Papers*, 33, 40-47 p.
- Álvarez I., Sam, O. & Reynaldo, I. (2005). Cambios inducidos por el aluminio en la morfogénesis radicular del arroz. *Cultivos Tropicales*, 26(1), 21-25.
- Arias, N. & Múnevar, F. (2004). Caracterización de la fertilidad de los suelos de la Zona Central palmera de Colombia. *Palmas*, 25(4), 135-147.
- Barceló, J. & Poschenrieder, C. (2002). Fast Root Growth Responses, Root Exudates, and Internal Detoxification as Clues to the Mechanisms of Aluminum Toxicity and Resistance: A review. *Environmental & Experimental Botany*, 48(1), 75-92.
- Böhm, W. (1979). *Methods of Studying Root Systems*. Springer-Verlag: Berlín. 190 p.
- Castro, H. & Gómez, M. (2010). Fertilidad de suelos y fertilizantes. En: *Ciencia del suelo. Principios Básicos*. Eds. Mojica y Burbano. Bogotá: Ed. Guadalupe S. A. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p.217-303.
- Corley, R. H. V. & Tinker, P. B. H. (2003). *The Oil Palm*. 4th Ed. London, UK: Blackwell Science.
- Cristancho, J., Hanafi, M., Syed, R. & Rafii, M. (2010). Variations in Oil Palm (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Progeny Response to High Aluminum Concentrations in Solution Culture. *Plant Biology*, 13(2), 33-42.

- Cristancho, J., Munévar, F., Acosta, A., Santacruz, L. & Torres, M. (2007). Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). *Palmas*, 28(1), 21-29.
- Goh, K. J. & Hardter, R. (2003). General Oil Palm Nutrition. En Fairhurst, T. H. y Hardter, R. (Eds.). *Managing Oil Palms for Large and Sustainable Yields*, Singapur: PPI/PPIC-IPI. pp. 191-230.
- Jourdan, C. & Rey, H. (1997). Modeling and Simulation of the Architecture and Development of the Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Root System. I. The Model. *Plant and Soil*, 190, 217-233.
- Liao, H., Wan, H., Sha', J., Wang, X., Yan, X. & Kochian, L. (2006). Phosphorus and Aluminum Interactions in Soybean in Relation to Aluminum Tolerance. Exudation of Specific Organic Acids from Different Regions of the Intact Root System. *Plant Physiology*, 141, 674-684.
- Ma, J., Ryan, P. & Delhaize, E. (2001). Aluminum Tolerance in Plants and the Complexing Role of Organic Acids. *Trends in Plant Science*, 6(6), 273-278.
- Malagón-Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos. Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 27(104): 319-341. ISSN 0370-3908.
- Molina, E. (1998). Encalado para corrección de la acidez del suelo. San José de Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo: . 45 p.
- Munévar, F. (1998). Problemática de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 19 (Especial), 218-228 p.
- Osorno, H. (2012). Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia. Trabajo de grado. Pag 7.