



Mejoramiento químico de suelos ácidos con enmiendas calcáreas en cultivo de rambután en Honduras*

Chemical improvement of acid soils using calcareous amendments in rambutan cultivation in Honduras

Breno Augusto Sosa-Rodriguez¹, Jesús Alexis Rodríguez-Matute¹, Marden Daniel Espinoza-Guardiola¹, Yuly Samanta García-Vivas¹, Johnny Pérez-Nuñez¹

* Recepción: 14 de enero, 2025. Aceptación: 27 de marzo, 2025. El proyecto formó parte del programa de investigación Manejo de Suelos Ácidos del Litoral Atlántico Hondureño, promovido por el grupo de investigación del Departamento de Suelos de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH).

¹ Universidad Nacional Autónoma de Honduras. La Ceiba, Honduras. breno.sosa@unah.edu.hn (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-7506-797X>); jesus.rodriguez@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0003-2758-6083>); marden.espinoza@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0001-6270-7173>); yuly.garcia@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0000-0003-1396-3829>); johnny.perez@unah.edu.hn (<https://orcid.org/0009-0009-4831-837X>).

Resumen

Introducción. La acidez del suelo genera toxicidad por altas concentraciones de aluminio y baja disponibilidad de macronutrientes en el cultivo de rambután (*Nephelium lappaceum*), lo que provoca altos costos de producción al corregirla con fertilizantes sintéticos y correctivos alcalinos. **Objetivo.** Mejorar indicadores de la acidez del suelo mediante el uso de dosis crecientes de dos enmiendas calcáreas en un cultivo de rambután ubicado en el litoral caribe de Honduras. **Materiales y métodos.** Se realizó un ensayo entre marzo y noviembre de 2023 en condiciones de campo en una finca de productor del municipio de San Francisco, Atlántida, Honduras. Se evaluaron dosis crecientes (0, 1, 2 y 3 Mg ha⁻¹) de dos enmiendas calcáreas: cal agrícola con 34,3 % Ca y 0,3 % Mg (CA), y calcita con 25,5 % Ca y 1,2 % Mg (CAL). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 4 × 4 y tres repeticiones, lo cual dio lugar a 16 tratamientos. Se midieron en cinco ocasiones el pH, el aluminio intercambiable (Al³⁺), la acidez intercambiable (Al³⁺ + H⁺) y el H⁺ en el suelo. **Resultados.** El uso individual de cada enmienda estimuló la corrección de los indicadores de acidez evaluados; la mejor dosis fue 3 Mg ha⁻¹. El pH del suelo aumentó con el incremento de las dosis de los dos materiales encalantes, y la mayor dosis (6 Mg ha⁻¹) combinando ambas enmiendas mostró la mejor respuesta. Las concentraciones de H⁺, Al³⁺ y Al³⁺ + H⁺ disminuyeron a medida que aumentaron las dosis del encalado, y se observó un efecto similar al usar entre 3 y 6 Mg ha⁻¹. En los parámetros analizados, los mejores resultados con cambios significativos, excepto H⁺, se registraron en el cuarto muestreo, seis meses después de la aplicación con CA. **Conclusiones.** Las dosis crecientes de ambas enmiendas calcáreas redujeron los indicadores de la acidez del suelo en el cultivo de rambután; la cal agrícola brindó mejor control.

Palabras clave: encalado, acidez del suelo, aluminio intercambiable, carbonato de calcio.



Abstract

Introduction. Soil acidity generates toxicity due to high aluminum concentrations and low macronutrients availability in rambutan (*Nephelium lappaceum*) cultivation, causing high production costs when corrected with synthetic fertilizers and alkaline correctives. **Objective.** To improve soil acidity indicators through the use of increasing doses of two calcareous amendments in a rambutan crop located on the Caribbean coast of Honduras. **Materials and methods.** A trial was carried out between March and November 2023 under field conditions on a producer's farm in the municipality of San Francisco, Atlántida, Honduras. Increasing doses (0, 1, 2 and 3 Mg ha⁻¹) of two types of calcareous amendments were evaluated: agricultural lime with 34.3 % Ca and 0.3 % Mg (CA), and calcite with 25.5 % Ca and 1.2 % Mg (CAL). A randomized complete block design with a 4 × 4 factorial arrangement and three repetitions was used, resulting in 16 treatments. Soil pH, exchangeable aluminum (Al³⁺), exchangeable acidity (Al³⁺ + H⁺), and H⁺ were measured on five occasions. **Results.** The individual use of each amendment stimulated the correction of the acidity indicators evaluated; the best dose was 3 Mg ha⁻¹. Soil pH increased with higher doses of both liming materials, and the highest dose (6 Mg ha⁻¹) combining both amendments showed the best response. The concentrations of H⁺, Al³⁺ and Al³⁺ + H⁺ decreased as liming doses increased, with a similar effect observed when using between 3 and 6 Mg ha⁻¹. For most of the parameters analyzed, except H⁺, significant changes were recorded at the fourth sampling, six months after the lime application, with CA showing better results. **Conclusions.** Increasing doses of both calcareous amendments reduced soil acidity indicators in rambutan cultivation, with agricultural lime providing better control.

Keywords: liming, soil acidity, exchangeable aluminum, calcium carbonate.

Introducción

Cerca del 70 % de los suelos a nivel mundial aptos o con potencial para la producción de alimentos son ácidos. Una de las causas de esta condición es la alta concentración de aluminio intercambiable (Al³⁺), que limita el crecimiento de las plantas por su toxicidad. Además, afecta la disponibilidad de nutrientes como fósforo, calcio y magnesio en el suelo (Muhammad et al., 2019).

La acidez en Oxisoles es común en zonas con clima tropical húmedo y alta precipitación, como el litoral caribe de Honduras, en el cual se registran entre 2900 y 3200 mm al año, en áreas donde se han establecido aproximadamente 3000 hectáreas de rambután. En estas plantaciones, predominan valores de pH de 4,5 a 5,0, con concentraciones de Al³⁺ mayores de 3 mg kg⁻¹, en plantaciones de diferentes edades, de 2 a 15 años (Sosa-Rodrigues & García-Vivas, 2020). La acidificación también inhibe la actividad microbiana en el suelo, lo que reduce la abundancia y diversidad de microorganismos (Wan et al., 2020), y afecta la sostenibilidad de los suelos agrícolas al disminuir la mineralización, así como el contenido y la distribución de la materia orgánica a través del perfil del suelo.

Para revertir la acidez del suelo se utilizan enmiendas calcáreas. Esta práctica eleva el valor del pH, lo cual disminuye los niveles de Al³⁺, Mn²⁺ y Fe²⁺, aporta calcio y magnesio, y aumenta la disponibilidad de fósforo. Además, favorece la mineralización de la materia orgánica (MO) y mejora el rendimiento de los cultivos (Díaz-Poveda & Sadeghian, 2022; Loaiza Loaiza, 2021; Raij, 2011; Rosas-Patiño et al., 2017).

En Honduras, existe una diversidad de materiales encalantes que varían según su lugar de procedencia natural y contenido nutricional, lo que a su vez afecta su poder relativo de neutralización total. A pesar de la disponibilidad de esta materia prima, su uso como enmienda es poco frecuente e incluso nulo en muchos sistemas productivos de rambután. En este ensayo se pretende utilizar estas tecnologías para analizar su potencial de corregir

dicha problemática, y a la vez, caracterizar su contenido nutricional. Por ello, se planteó como objetivo mejorar indicadores de la acidez del suelo mediante el uso de dosis crecientes de dos enmiendas calcáreas en un cultivo de rambután ubicado en el litoral caribe de Honduras.

Materiales y métodos

Caracterización del área experimental

La investigación se realizó entre marzo y noviembre de 2023 en plantaciones de rambután (*Nephelium lappaceum*) del productor Enso Díaz, aldea Las Camelias, municipio de San Francisco, departamento de Atlántida, Honduras. La plantación está situada a 15° 39' 17,7" latitud norte y 87° 00' 50,7" longitud oeste, a una altitud de 56 m s. n. m. Esta finca se encuentra a 27 km de la estación meteorológica de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH-CURLA) ubicada en el municipio de La Ceiba, y a 9 km de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola en el municipio de La Másica.

La zona experimental se caracteriza por una temperatura promedio entre 27 y 29,5 °C, una humedad relativa de 88 a 95 %, y una precipitación anual entre 3100 y 3230 mm (Figura 1). La época lluviosa se extiende desde mediados de septiembre hasta febrero, periodo en el que se registra aproximadamente el 70 % de la precipitación (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, 2022).

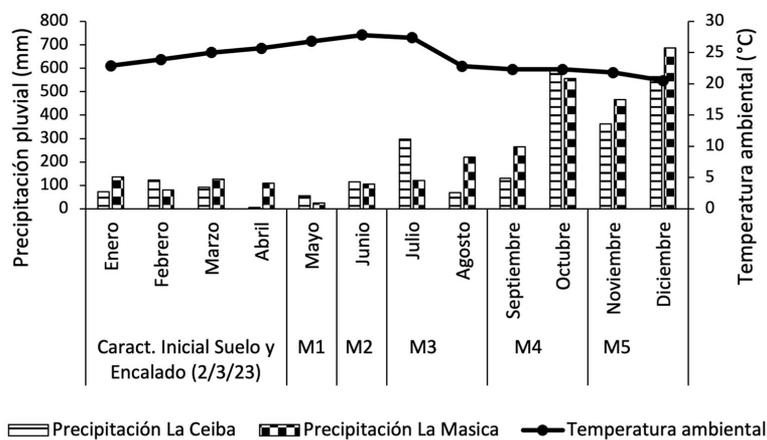


Figura 1. Precipitación pluvial y temperatura ambiental anual de los municipios de La Ceiba y La Masica, Atlántida, durante la investigación (desde la instalación del ensayo hasta el quinto y último muestreo, M5) en el año 2023.

Figure 1. Annual rainfall and ambient temperature of the municipalities of La Ceiba and La Masica, Atlántida, during the investigation (from the installation of the test to the fifth and final sampling, M5) in 2023.

Para el análisis del suelo experimental, se recolectaron diez submuestras al azar en la ladera, a una profundidad de 20 cm, en la mitad de la copa del árbol (Cuadro 1). Las características fisicoquímicas se determinaron siguiendo las metodologías del Western Hemisphere Analytical Laboratory (WHAL) de Standard Fruit de Honduras S. A. y del laboratorio de Suelos del Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico (CURLA). Los resultados se interpretaron según escalas internacionales (Castro & Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2004; Sela, 2021).

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica del suelo a una profundidad de 0-20 cm, utilizado para evaluar el efecto de enmiendas calcáreas sobre la acidez del suelo sembrado con rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023.

Table 1. Physicochemical characterization of the soil at a depth of 0-20 cm, used to evaluate the effect of calcareous amendments on the acidity of soil planted with rambutan. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Parámetro	Unidad	Valor	Nivel	Método	Referencia
pH	Global	4,55	Muy ácido	Solución acuosa 1:1	
CE	dS m ⁻¹	0,10	Bajo	Extracto saturado, conductancia	Jones (1999)
N		0,14	Medio		
MO	%	2,05	Medio	Factor Van Benmelen	Jackson (1956)
Al ³⁺ + H ⁺		2,72	Alto	Extracción con KCL	Alley y Zelazny (1987)
K		0,11	Bajo		
Ca	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0,32	Bajo		
Mg		0,15	Bajo		
Na		0,06	Bajo		
P		3,17	Muy bajo		
S		34,32	Alto	Detección con ICP-OES, Mehlich-3	Jones (1999)
B		0,06	Bajo		
Fe	mg kg ⁻¹	151,92	Alto		
Mn		123,16	Alto		
Cu		1,08	Bajo		
Zn		1,02	Bajo		
Densidad aparente		2,11	Compactado	Cilindro biselado	
Densidad real	Mg m ³	2,65	Constante	Valor referencia	Jaramillo (2002)
Porosidad total	%	20,40	Baja	Fórmula matemática	
Color	Código	5YR 4/6	Rojo amarillento	Tabla Munsell	Soil Survey Staff (2022)
Textura	Clase textural	Franco arcillosa	Laborable	Pipeta	Bouyoucos (1962)
Estructura	Clase	Granular	Firme	Clasificación en campo	Soil Survey Division Staff (1993)

MO: Materia orgánica; **CE:** Conductividad eléctrica. / **MO:** Organic matter; **CE:** Electrical conductivity.

La elevada acidez intercambiable, junto con los altos niveles de Mn y Fe, y el pH bajo, reflejan una fuerte acidez del suelo que dificulta la actividad biológica. Además, el suelo registra niveles medios de materia orgánica y N total, lo que da lugar a una mineralización deficiente y un soporte nutricional ineficiente. Esto se ve reflejado en la baja disponibilidad de nutrientes, como las bases cambiables P y los micronutrientes Cu, Zn y B.

Los indicadores físicos del suelo (Cuadro 1) mostraron que la textura franco-arcillosa es laborable. La estructura granular sugiere una infiltración moderada del agua. La coloración amarillenta rojiza se debe a la elevada

precipitación y los altos niveles de Fe^{2+} durante los periodos de sequía. La alta densidad aparente ($2,11 \text{ Mg m}^{-3}$) y la baja porosidad total (20,4 %) indican una significativa compactación del suelo, lo cual afecta negativamente el crecimiento de raíces, predispone a la erosión y reduce la disponibilidad de nutrientes para el cultivo (Jaramillo, 2002). Dado que muchas de estas plantaciones están en laderas y reciben intensas lluvias durante la temporada de invierno, la fertilidad del suelo se ve afectada gravemente.

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron dos factores principales, dos tipos de enmiendas calcáreas: cal agrícola CaCO_3 (CA) con 34,3 % Ca y 0,3 % Mg, y calcita CaCO_3 (CAL) con 25,5 % Ca y 1,2 % Mg, cuatro dosis crecientes (niveles) de cada material y sus interacciones (Cuadro 2). El diseño fue de bloques completos al azar con un arreglo factorial 4×4 y tres repeticiones, para un total de 16 tratamientos (interacción de factores). Las dosis por hectárea de cada material encalante fueron de 0, 1, 2 y 3 Mg ha^{-1} (T1, T2, T3 y T4), distribuidas en el área de la copa de cada planta ($28,27 \text{ m}^2$) para corresponder a 0, 2,83, 5,65 y 8,48 kg por planta, respectivamente. En los tratamientos T5 a T16, se mezclaron cal agrícola y calcita, y las dosis se incrementaron desde 1 Mg ha^{-1} (T2) hasta llegar a un máximo de 6 Mg ha^{-1} (T16).

Cuadro 2. Descripción de materiales encalantes (factores principales) y tratamientos (interacción) aplicados al suelo en el cultivo de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 2. Description of liming materials (main factors) and treatments (interaction) applied to the soil in rambutan cultivation. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Material encalante (Factores principales)		Descripción		(Interacción)
Cal agrícola (34,3 % Ca y 0,3 % Mg) - CA	Calcita (25,5 % Ca y 1,2 % de Mg) - CAL	Mg ha^{-1}	kg/planta	Tratamientos
0	0	CA 0 + CAL 0	0 + 0	T1
	1	CA 0 + CAL 1	0 + 2,83	T2
	2	CA 0 + CAL 2	0 + 5,65	T3
	3	CA 0 + CAL 3	0 + 8,48	T4
1	0	CA 1 + CAL 0	2,83 + 0	T5
	1	CA 1 + CAL 1	2,83 + 2,83	T6
	2	CA 1 + CAL 2	2,83 + 5,65	T7
	3	CA 1 + CAL 3	2,83 + 8,48	T8
2	0	CA 2 + CAL 0	5,65 + 0	T9
	1	CA 2 + CAL 1	5,65 + 2,83	T10
	2	CA 2 + CAL 2	5,65 + 5,65	T11
	3	CA 2 + CAL 3	5,65 + 8,48	T12
3	0	CA 3 + CAL 0	8,48 + 0	T13
	1	CA 3 + CAL 1	8,48 + 2,83	T14
	2	CA 3 + CAL 2	8,48 + 5,65	T15
	3	CA 3 + CAL 3	8,48 + 8,48	T16

Manejo agronómico de las parcelas

La plantación, sembrada en un Oxisol (Soil Survey Staff, 2014), ha sido productiva por quince años. Las unidades experimentales consistieron en parcelas de campo con una dimensión de 144 m² (12 × 12 m) para cada tratamiento. Cada parcela contenía dos árboles de rambután, plantados a 6 × 6 m al tresbolillo, con una densidad de 321 plantas por hectárea y un área total del experimento de 6912 m². Cada tratamiento tenía otras plantas alrededor como área de borde, con fines comerciales. Las variedades utilizadas en el experimento fueron R-134, R-162 y R-167, distribuidas al azar en los tratamientos, sin identificación por parte del productor, ya que no existe certificación del vivero. Estos materiales fueron seleccionados por su aceptación organoléptica en el mercado nacional.

Durante el ciclo fisiológico del cultivo, se observó que la cosecha concluyó entre diciembre y enero (dependiendo de la variedad), seguida de la poda al mes siguiente. La fertilización anual consistió en la aplicación de 4,1 kg de fertilizante por planta, distribuido en tres etapas: 1,36 kg entre enero y febrero, compuesto por una mezcla de 50 % urea y 50 % triple 15 (15-15-15); 0,68 kg de KCl más 0,68 kg de triple 15 entre abril y mayo, y una aplicación idéntica entre los meses de julio y agosto.

Las enmiendas calcáreas se aplicaron a inicios de marzo, dos meses después de la cosecha y la poda. Se usaron por única vez alrededor del área efectiva de la copa (3 m de radio) del árbol. Se removió la materia orgánica con rastrillo cuando fue necesario, para que el material encalante tuviera contacto directo con el suelo.

VARIABLES EVALUADAS

Las cuatro dosis de cada enmienda calcárea como variables independientes se dispusieron sobre el suelo para reaccionar durante tres meses. El primer muestreo de las variables dependientes (pH, Al³⁺, Al³⁺ + H⁺, H⁺) se realizó en junio, y se efectuaron cuatro muestreos más según recursos logísticos (vehículo) y condiciones ambientales, principalmente las lluvias. Las muestras compuestas de suelo de cada tratamiento se recolectaron a una profundidad de 20 cm en la zona de goteo de los árboles seleccionados al azar en esquema Z.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los resultados obtenidos en cada variable (pH, Al³⁺, Al³⁺ + H⁺, H⁺) se analizaron utilizando el programa informático SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2002). Para determinar cuáles factores o componentes del diseño presentaron diferencias, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA). Además, se ejecutaron pruebas de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5 % para identificar cuáles medias de factores y niveles, interacción de factores (tratamiento) y muestreo tuvieron diferencias.

Para comparar el tratamiento testigo (sin ningún tipo de cal) con los demás tratamientos, se usó la prueba de Dunnett. La comparación de ciertos grupos de medias de tratamiento de interés se llevó a cabo mediante contrastes ortogonales. La relación entre las dosis de los materiales encalantes y las distintas variables medidas se determinó por medio de un análisis de regresión.

Resultados

Dinámica del pH, aluminio, acidez activa e intercambiable del suelo con el uso y manejo de los materiales encalantes

El ANDEVA arrojó diferencias estadísticas en los factores principales, cal agrícola (CA) y calcita (CAL), para los indicadores de acidez monitoreados (Cuadro 3). También se encontró significancia para los tratamientos (interacción de factores) en las variables Al^{3+} , $Al^{3+} + H^+$ y H^+ , con excepción del pH del suelo, donde el estímulo fue similar (Figura 2). Al usar la enmienda CA, la condición de acidez fue disminuyendo a través de los parámetros evaluados y se observó que la dosis de 3 Mg ha⁻¹ fue la que generó mayor impacto. Un comportamiento similar promovió la CAL respecto a las variables analizadas, al inducir una corrección progresiva con la máxima dosis.

Cuadro 3. Indicadores de acidez del suelo en función de las dosis (0, 1, 2 y 3 Mg ha⁻¹) de cada factor principal (cal agrícola y calcita). Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 3. Soil acidity indicators based on the doses (0, 1, 2 and 3 Mg ha⁻¹) of each main factor (agricultural lime and calcite). Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

Factores principales	Dosis	Al^{3+}	H^+ cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	$Al^{3+} + H^+$	pH
	Mg ha ⁻¹				
Cal agrícola CA	0	2,73 a	0,39 a	3,13 a	4,78 c
	1	2,08 b	0,34 ab	2,43 b	4,88 bc
	2	1,44 c	0,28 bc	1,73 c	5,11 b
	3	1,25 c	0,22 c	1,47 c	5,39 a
Calcita CAL	0	2,51 a	0,37 a	2,90 a	4,94 b
	1	1,96 ab	0,33 ab	2,30 ab	4,94 b
	2	1,62 bc	0,27 b	1,90 bc	5,06 ab
	3	1,41 c	0,25 b	1,66 c	5,19 a

abc: Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). / abc: Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

El pH del suelo tuvo un comportamiento similar significativamente ($p < 0,05$) entre los tratamientos (Figura 2). La condición más ácida se registró en el tratamiento sin enmienda (T1, 4,52), y aumentó de manera progresiva con mayores dosis de encalado, independientemente del corrector de acidez utilizado. El tratamiento T16 mostró el mayor incremento en el pH (5,4).

Durante la investigación, los muestreos realizados presentaron diferencias significativas (Figura 2), según el ANDEVA. Este indicó que las fluctuaciones del pH fueron inducidas por el encalado. El pH registrado al inicio del experimento fue de 4,55; tres meses después de la aplicación de los materiales, el valor ascendió a 4,74 en el primer muestreo (M1), estadísticamente similar al M3 (4,84). Seis meses después de la aplicación (29 de septiembre de 2023), el encalado estimuló una mayor reacción y alcanzó los 5,41, para luego descender a 5,01 en el último muestreo, posiblemente debido a las fuertes precipitaciones pluviales en la zona de producción.

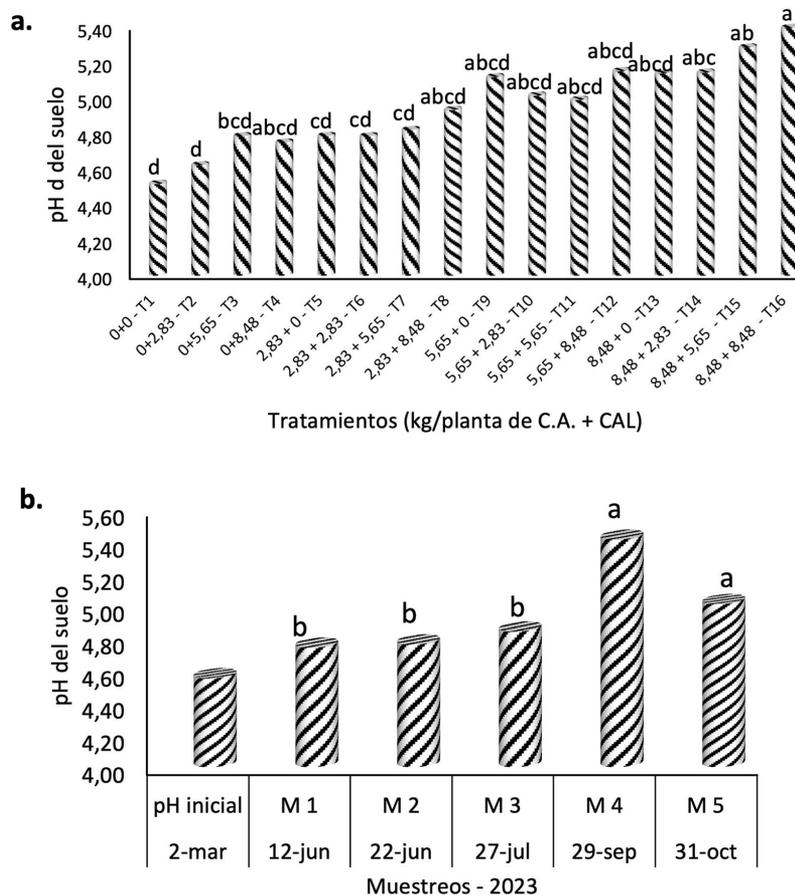


Figura 2. Variación del pH entre los tratamientos (interacción de factores) (a) y los muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023.

mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)... T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Figure 2. Variation of pH between treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)... T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

La acidez intercambiable en los suelos mostró diferencias significativas entre los tratamientos, con el valor más alto reportado en el testigo ($4,8 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). A medida que aumentaron las dosis de encalado, la acidez disminuyó y alcanzó valores de $1,63 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en el tratamiento T10 y $1,40 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en el T16. El T15 registró el valor más bajo ($1,27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) (Figura 3). Sin embargo, desde el uso de 2 Mg ha^{-1} del encalado en el T3 hasta la dosis máxima en T16, no se observaron diferencias estadísticas.

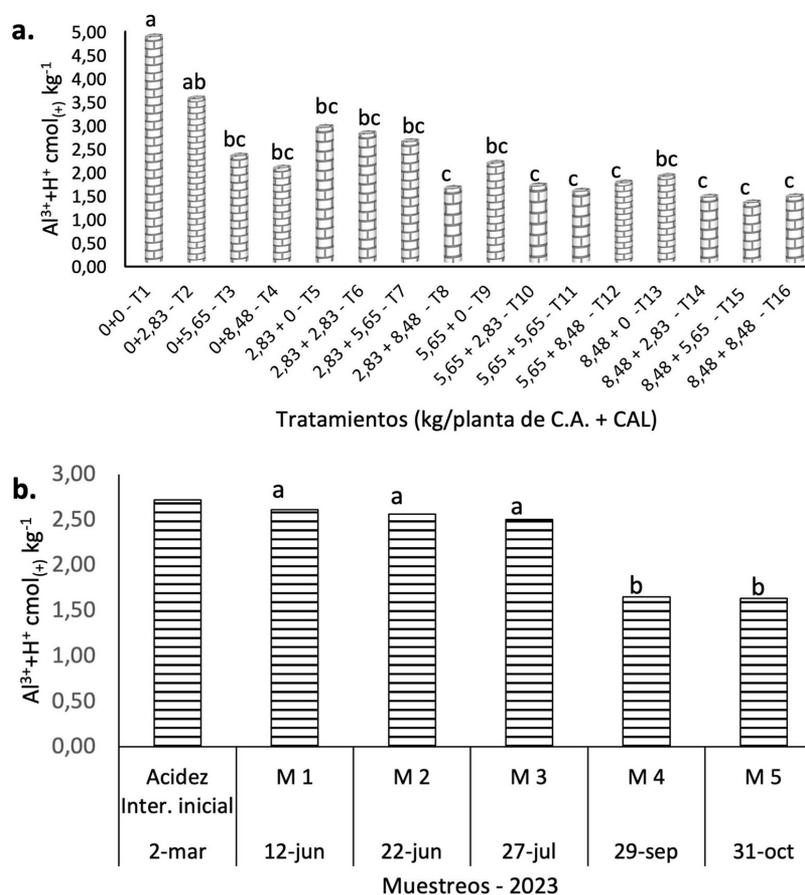


Figura 3. Dinámica de la acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) en los tratamientos (interacción de factores) (a) y los muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)... T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Figure 3. Dynamics of exchangeable acidity ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) in treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)... T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

La acidez intercambiable varió significativamente entre los muestreos (Figura 3). Al inicio de la investigación, el valor registrado fue de $2,72 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$, que fue disminuyendo con el tiempo después de la aplicación del encalado y pasó de $2,61 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ en el M1 a $2,51 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ en el M3, aunque sin diferencias estadísticas en ese momento. Sin embargo, seis meses después se observó una reducción significativa de la acidez, ya que en el muestreo 4 se reportó un valor de $1,65 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$, para mantener dicha tendencia en el M5.

El aluminio cambió de forma significativa entre los tratamientos (Figura 4). Las concentraciones registradas fueron elevadas, con el T1 mostrando el mayor valor, el cual sobrepasa los límites ($2-3 \text{ mg kg}^{-1}$) permitidos para considerar este elemento un problema para el suelo y la planta. A medida que aumentaban las dosis, independientemente del material encalante, el Al^{3+} disminuyó de $1,6 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ en el T10 a valores más bajos en el T16.

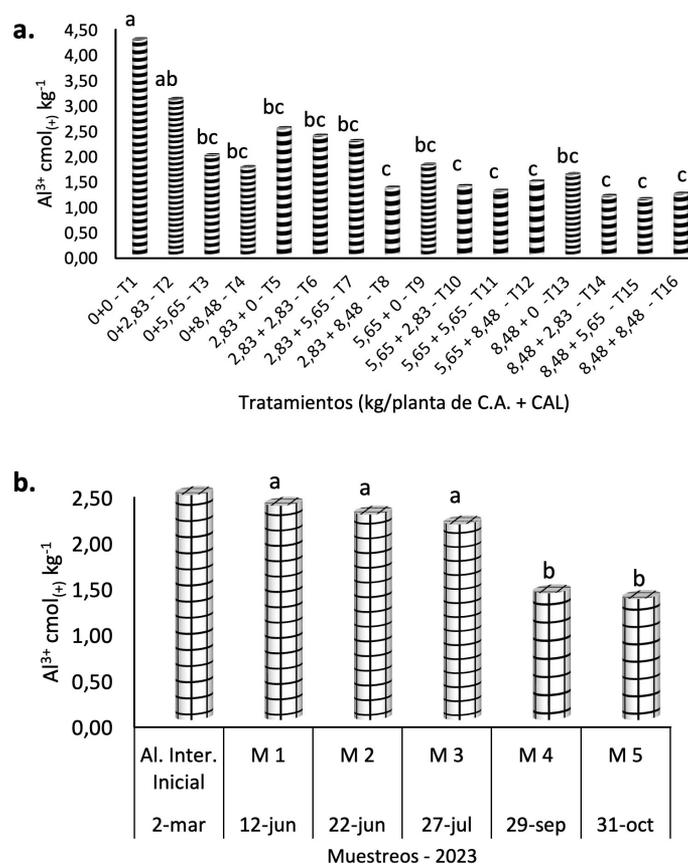


Figura 4. Dinámica del aluminio intercambiable (Al^{3+}) entre tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)...T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Figure 4. Dynamics of exchangeable aluminum (Al^{3+}) between treatments (interaction of factors) (a) and samplings (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

El uso de enmiendas generó una reducción significativa del aluminio entre los muestreos (Figura 4). Desde el valor inicial de $2,45 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$ hasta el tercer muestreo, estos fueron similares estadísticamente ($2,3, 2,2$ y

2,1, respectivamente). Fue hasta el cuarto muestreo, seis meses después de la aplicación, donde se registró una disminución pronunciada (1,4), para mantener dicha tendencia hasta el final del estudio.

La acidez activa (H^+) en el suelo presentó cambios significativos entre los tratamientos (Figura 5). Los valores más elevados se encontraron en los tratamientos sin enmiendas ($0,54 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$), mientras que los valores más bajos y consistentes se registraron en los tratamientos T10 al T16, que fueron iguales estadísticamente, con valores menores a $0,28 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$.

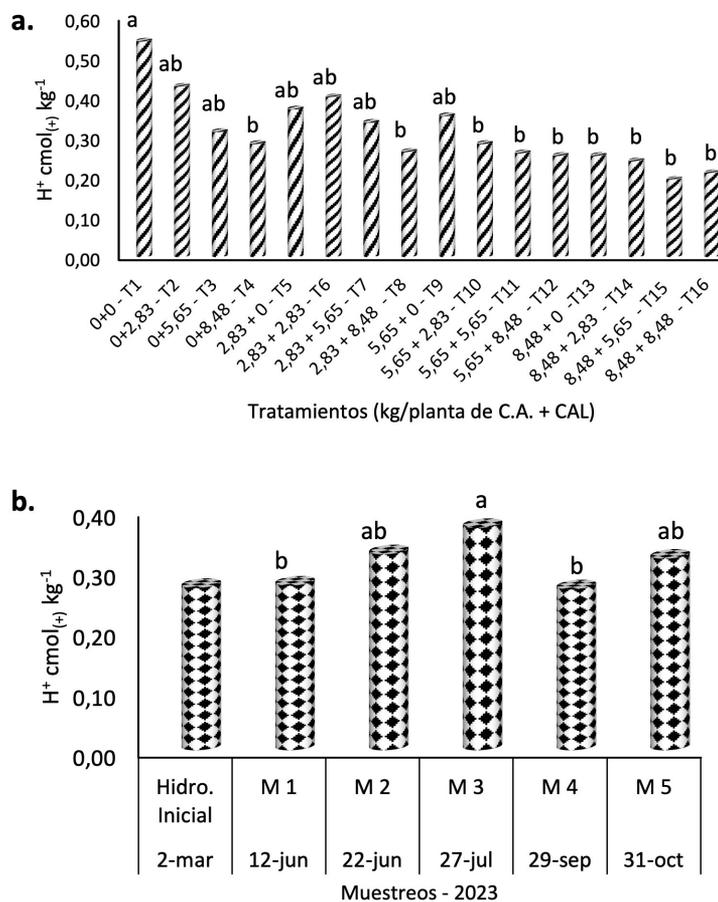


Figura 5. Cambios en la acidez activa (H^+) del suelo entre tratamientos (interacción de factores) (a) y muestreos (b) durante la evaluación de los materiales encalantes en suelos ácidos del sistema de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023. mar: marzo; jun: junio; jul: julio; sep: septiembre; oct: octubre.

T1: tratamiento con 0 kg/planta de cal agrícola (CA) + 0 kg/planta de calcita (CAL)...T16: tratamiento con 8,48 kg/planta de cal agrícola (CA) + 8,48 kg/planta de calcita (CAL).

Promedios con igual letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Figure 5. Changes in active soil acidity (H^+) of the soil between treatments (interaction of factors) (a) and sampling (b) during the evaluation of liming materials in acidic soils of the rambutan system. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

mar: March; jun: June; jul: July; sep: September; oct: October.

T1: treatment with 0 kg/plant of agricultural lime (CA) + 0 kg/plant of calcite (CAL)...T16: treatment with 8.48 kg/plant of agricultural lime (CA) + 8.48 kg/plant of calcite (CAL).

Averages with the same letter do not differ significantly according to the Tukey test ($p < 0.05$).

En cuanto a los muestreos, la acidez activa también mostró diferencias significativas (Figura 5). Desde el análisis inicial ($0,27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$), las concentraciones aumentaron hasta el tercer muestreo ($0,37 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Luego transcurrió un mes para descender a $0,27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ y tener un rebote ascendente al final de $0,32 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$. Aun así, todos los muestreos, con excepción del tercero, no difirieron estadísticamente.

Reacción de la acidez del suelo con el uso de dos tipos de materiales encalantes

El efecto de los dos materiales encalantes fue significativo en la variación de los indicadores de acidez del suelo (Figura 6). A medida que incrementaban las dosis de las enmiendas, también lo hacía el pH del suelo; sin embargo,

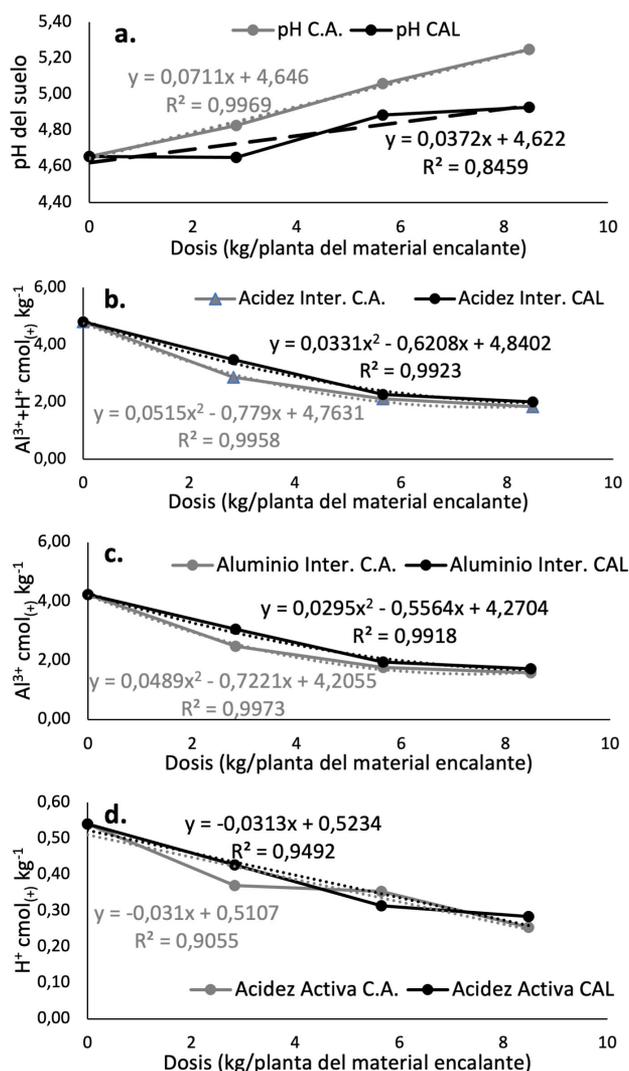


Figura 6. Efecto de los dos tipos de material encalante y diferentes dosis sobre el pH (a), la acidez intercambiabile ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) (b), el aluminio intercambiabile (Al^{3+}) (c) y la acidez activa (H^+) (d). Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre, 2023.

Figure 6. Effect of the two types of liming material and different doses on pH (a), exchangeable acidity ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) (b), exchangeable aluminum (Al^{3+}) (c), and active acidity (H^+) (d). Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

la magnitud de la neutralización difirió entre ambas. La cal agrícola (CA) estimuló un mayor aumento del pH, que alcanzó valores de 5 con 5,65 kg/planta, y el valor más alto para esta enmienda se observó con dosis de 8,48 kg/planta. La calcita (CAL) tuvo una menor incidencia en la neutralización, ya que a la mayor dosis (8,48 kg/planta) el pH registrado fue de solo 4,92.

La acidez intercambiable del suelo disminuyó a medida que se incrementaron las dosis de los materiales encalantes. Se hallaron valores de 4,79 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ cuando no se aplicó encalado, y disminuyeron a 1,8-2 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ con las dosis más altas de enmiendas. Esto evidencia que el uso de correctivos de acidez es una tecnología útil y efectiva, aunque la capacidad de neutralizar la acidez varía entre ambos materiales; en este caso, la CA estimuló una mejor respuesta, aunque leve, en comparación con la CAL.

La neutralización del aluminio intercambiable y la acidez activa fue efectiva con el encalado utilizado. A medida que aumentaban las dosis, estos parámetros disminuyeron en sus concentraciones, con una mejor respuesta para Al^{3+} con CA. En cuanto a la acidez positiva (H^+), las enmiendas mostraron un efecto fluctuante. Con la aplicación de 8,48 kg de encalado, los valores de aluminio se redujeron a rangos de 1,5-1,7 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$.

Al comparar las plantas tratadas con los materiales encalantes versus el testigo (T1), sin aplicación alguna, se observó que la práctica agrícola impactó significativamente los indicadores de acidez (Cuadro 4). En cuanto al pH del suelo, se registró un cambio significativo después de la aplicación de 8,48 kg de CA (T13). Por otro lado, la acidez activa, la acidez intercambiable y el aluminio fueron más sensibles, con fluctuaciones detectadas desde el T2 en adelante.

Cuadro 4. Comparación por contrastes ortogonales en los tratamientos aplicados al cultivo de rambután. Las Camelias, Honduras. Marzo a noviembre 2023.

Table 3. Comparison by orthogonal contrasts in the treatments applied to the rambutan crop. Las Camelias, Honduras. March to November 2023.

	pH en el suelo	Acidez intercambiable	Aluminio	Acidez activa
	16 - 1***	2 - 1 ns	2 - 1 ns	2 - 1 ns
	15 - 1***	5 - 1***	5 - 1***	6 - 1 ns
	14 - 1***	6 - 1***	6 - 1***	5 - 1 ns
	13 - 1***	7 - 1***	7 - 1***	9 - 1 ns
	12 - 1 ns	3 - 1***	3 - 1***	7 - 1***
	8 - 1 ns	9 - 1***	9 - 1***	3 - 1***
	11 - 1 ns	4 - 1***	4 - 1***	4 - 1***
	9 - 1 ns	13 - 1***	13 - 1***	10 - 1***
	10 - 1 ns	12 - 1***	12 - 1***	8 - 1***
	4 - 1 ns	10 - 1***	10 - 1***	11 - 1***
	3 - 1 ns	8 - 1***	8 - 1***	13 - 1***
	5 - 1 ns	11 - 1***	11 - 1***	12 - 1***
	7 - 1 ns	16 - 1***	16 - 1***	14 - 1***
	6 - 1 ns	14 - 1***	14 - 1***	16 - 1***
	2 - 1 ns	15 - 1***	15 - 1***	15 - 1***

ns = no significativo; *** = altamente significativo. / ns = no significant; *** = highly significant.

Discusión

El uso de enmiendas calcáreas es una práctica común para corregir la acidez del suelo. En el sistema de rambután analizado, las propiedades de acidez monitoreadas mejoraron con el uso por separado de ambas enmiendas en dosis de 3 Mg ha⁻¹, acentuando su efecto cuando se combinaron las calcitas a razón de 6 Mg ha⁻¹. El pH aumentó con el incremento de las dosis de enmiendas, de manera similar a los reportado por Rosas-Patiño et al. (2017) en el cultivo de cacao y Alvarado-Ochoa et al. (2024) en suelos ácidos de Ecuador. La reacción de neutralización de forma significativa en el suelo demoró 6 meses (M4) desde su aplicación. Es posible que el suelo presentara resistencia al cambio de pH debido a su alto contenido de arcilla, óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso, lo que le confiere un fuerte poder *buffer* (He et al., 2011).

Al final de la etapa de muestreo el pH descendió. La región atlántica donde se realizó la investigación se caracteriza por una alta pluviosidad, la cual registró 593,2 mm en octubre y 363,3 mm en noviembre, según datos de la estación meteorológica del UNAH-CURLA. La acidez del suelo se debe a la presencia de protones H⁺, que provienen de la hidrólisis del dióxido de carbono (CO₂) por la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos, los grupos ácidos de la materia orgánica, de los grupos oxhidrilos (OH⁻) de las láminas de aluminosilicatos y los fertilizantes (Haynes & Mokolabate, 2001; Iturri, 2015).

Las concentraciones de acidez intercambiable en el suelo disminuyeron a medida que incrementaron las dosis del encalado; sin embargo, los niveles más bajos registrados fueron entre 1,27 y 1,83 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en los tratamientos más eficientes. No obstante, la problemática persiste, ya que en muchos suelos los niveles permitidos en sistemas agrícolas varían desde 0,5 hasta 2 cmol₍₊₎ kg⁻¹ (Balsberg Pålsson, 1990). Por ello, resulta pertinente dar seguimiento al manejo del suelo durante más tiempo en estas condiciones.

Es posible que la producción de hidroxilo del material encalante no haya sido suficiente para neutralizar el metal hasta niveles aceptables. En el futuro, aumentar la dosis, realizar dos aplicaciones al año o usar materiales con mayor poder relativo de neutralización total (PRNT) podrían ser alternativas a implementar junto al productor. Factores relacionados con la dosis y los tipos de enmiendas fueron utilizados en suelos ácidos para mejorar la fertilidad, y se encontró que dosis superiores a 4 Mg ha⁻¹ y el uso de óxido de calcio resultaron más eficientes en el control de la acidez (Terrones Cotrina, 2024).

El aluminio intercambiable (Al³⁺) es una de las principales limitantes para la producción agropecuaria en el mundo, debido a su capacidad de generar intoxicación en las plantas y afectar la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, principalmente calcio, magnesio, fósforo y nitrógeno (Muhammad et al., 2019; Wan et al., 2020). Las concentraciones de aluminio, acidez intercambiable e hidrógeno en el suelo disminuyeron de forma significativa con el encalado a dosis de 6 Mg ha⁻¹ en el estudio de Coronado Llanos (2024).

El cultivo de rambután ha demostrado tolerar concentraciones mayores de 3 ppm, en plantaciones de diferentes edades, de 2 a 15 años, y mantener su capacidad productiva en distintos municipios del departamento de Atlántida, Honduras (Sosa-Rodrigues & García-Vivas, 2020).

La velocidad del control de la acidez varía en los agroecosistemas, según el material encalante, el clima y las características del suelo (Yan et al., 2022). Después de la aplicación de las enmiendas, la acidez intercambiable se redujo levemente en cuatro meses, y se observaron diferencias significativas en el muestreo hasta el sexto mes, cuando las concentraciones disminuyeron de forma considerable. Este comportamiento entre el pH y la acidez intercambiable puede atribuirse al desplazamiento y/o precipitación del H⁺ y Al³⁺, que ocurre cuando el Ca²⁺ se disocia del CO₃²⁻, lo cual produce un incremento en la concentración de iones OH⁻ en la solución del suelo (Vázquez & Millán, 2017).

La eficacia del encalado y su efecto en el tiempo varían según múltiples experiencias. En sistemas de pasturas, la reducción de 4 a 1 cmol₍₊₎ kg⁻¹ demoró un año con una dosis de 6 Mg ha⁻¹, para luego aumentar a 3 cmol₍₊₎ kg⁻¹

en el tercer año, mientras que el pH pasó de 4,8 a 7 en el primer año, y descendió a 5,5 en el tercer año (Ramírez Pedroso et al., 2021). En el cultivo de piña en un Ultisol, la aplicación de enmiendas (CaCO_3) elevó el pH de 4,8 a 5,2 a los 60 días, pero, después de 124 días, los valores disminuyeron en todos los tratamientos a menos de 4,5 (Álvarez Jiménez, 2023). Esto refleja la capacidad *buffer* del suelo ante cambios en el pH.

El análisis por separado del aluminio intercambiable (Al^{3+}) y la acidez activa (H^+) mostró un comportamiento similar al de la acidez intercambiable. Sin embargo, destaca la tendencia creciente del H^+ en cada muestreo (Figura 4), la cual no corresponde al resto de los indicadores de acidez. El hidrógeno proviene de diferentes fuentes, como la fertilización nitrogenada, las lluvias, el material parental y la materia orgánica (Bolan & Hedley, 2003; Chien et al., 2008; Goulding, 2016). Aunque el aluminio pudo haberse neutralizado parcialmente con el aumento del pH, no fue suficiente, ya que el pH se mantuvo cercano a 5,5, con Al^{3+} superior a $1 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ y precipitaciones constantes, lo que dificulta la disminución del catión y hace necesario proseguir con la práctica.

El análisis de regresión mostró una relación entre el material encalante y el pH del suelo. Las dosis crecientes de CA y CAL elevaron el pH en distintas magnitudes, con 8,48 kg por planta (equivalente a 3 Mg ha^{-1}) de ambos materiales; el pH subió a 5,4 para CA y a 4,92 para CAL. Esto se atribuye al PRNT de las enmiendas, la capacidad *buffer* que brindan los coloides y las precipitaciones pluviales, que inciden en la efectividad de esta práctica agronómica.

El material CA posee 34,3 % de Ca y 0,3 % de Mg, obteniendo un PRNT de 50,17 %, mientras que CAL contiene 25,5 % de Ca y 1,2 % de Mg para un PRNT de 45,11 %. Este parámetro permite comprender la capacidad de la enmienda para controlar la acidez del suelo en un lapso de tres meses (Espinosa & Molina, 1999). En este sentido, las concentraciones de $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ disminuyeron, desde $4,8 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ hasta 1,8 para el encalante CA y a 2 para CAL. La dosis de 8,48 kg/planta, equivalente a 3 Mg ha^{-1} , fue la más efectiva para el control. Al analizar el potencial de neutralización del material encalante, Tasilla Salazar (2021) demostró que al reducir la granulometría ($\leq 0,3 \text{ mm}$) del producto aplicado a una dosis de 2 Mg ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtuvo un aumento del valor del pH, pasando de 5,69 a 6,79.

Se registró que para reducir un $\text{cmol}_{(+) }$ de $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ es necesario aplicar aproximadamente 1000 kg de material encalante y esperar de cuatro a seis meses para la neutralización, ya que los OH^- generados por la hidrólisis del carbonato en la enmienda son contrarrestados por la producción excesiva de H^+ , causada por el material parental, el aluminio y, sobre todo, la lluvia. Después de la neutralización inicial, el pH comenzó a bajar en el muestreo 5. El suelo se acidifica debido a las reacciones del agua con Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y NO_3^- , que liberan H^+ a la solución (Fassbender & Bornemisza, 1987). Por lo tanto, es vital el monitoreo constante de estos parámetros en dicha zona.

Conclusiones

Las concentraciones de acidez (H^+ , Al^{3+} y $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) en el suelo disminuyeron de manera significativa a los seis meses con el uso aislado (3 Mg ha^{-1}) y combinado (6 Mg ha^{-1}) de cal agrícola y calcita en plantas de rambután, mientras que el pH se incrementó de forma paralela a la aplicación. La cal agrícola con mayor poder relativo de neutralización total fue ligeramente más eficiente en la mejora de los indicadores. La precipitación pluvial y el poder relativo de neutralización total de la enmienda son factores que modulan la neutralización de la acidez del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Finos Agroindustriales por el financiamiento y la logística brindados a lo largo del proyecto. La información compartida es responsabilidad de los autores y ha sido consensuada científicamente.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

- Alley, M. M., & Zelazny, L. W. (1987). Soil acidity: Soil pH and lime needs. In J. R. Brown (Ed.), *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation* (Vol. 21, pp. 65–72). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub21.c7>
- Alvarado-Ochoa, S., Chico, J., Espinosa, J., Rivera, M., Córdova, J., & Valverde, F. (2024). El encalado y su relación con la fertilidad de suelos ácidos ecuatorianos. *Siembra*, *11*(3), Artículo e5564. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/5564>
- Álvarez Jiménez, L. M. (2023). *Efecto de la aplicación de enmiendas convencionales y micronizadas en la acidez de un ultisol y en el crecimiento de piña, en Río Cuarto, Alajuela, Costa Rica* [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Kérwá. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/f57d147e-26fc-4415-97cd-3317cb6beeb>
- Balsberg Pålsson, A.-M. (1990). Influence of aluminium on biomass, nutrients, soluble carbohydrates and phenols in beech (*Fagus sylvatica*). *Physiologia Plantarum*, *78*(1), 79–84. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1990.tb08718.x>
- Bolan, N. S., & Hedley, M. J. (2003). Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In Z. Rengel (Ed.), *Handbook of Soil Acidity* (1st ed., Chapter 2, pp. 29–52). CRC Press.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Castro, H., & Centro Internacional de Agricultura Tropical. (2004). Propuesta guía de indicadores analíticos para calificar suelos estables y en proceso de degradación desde el punto de vista físico. En Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ed.), *Memorias I Taller Nacional sobre indicadores de calidad del suelo* (pp. 37–42). Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Chien, S. H., Gearhart, M. M., & Collamer, D. J. (2008). The effect of different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *Soil Science*, *173*(8), 544–551. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31817d9d17>
- Coronado Llanos, N. (2024). *Efecto del encalado en la acidez del suelo en el Caserío La Totorá, Distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7548>
- Díaz-Poveda, V. C., & Sadeghian, S. S. (2022). Eficiencia de enmiendas utilizadas como correctivos de la acidez del suelo en el cultivo del café en Colombia. *Revista Cenicafé*, *73*(1), Artículo e73103. <https://doi.org/10.38141/10778/73103>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. International Plant Nutrition Institute.
- Fassbender, H., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. (2022). *Informe técnico 2022 programa de cacao y agroforestería*. https://fhia.org.hn/wp-content/uploads/inf_Programa_de_Cacao_y_Agroforesteria-2022.pdf

- Goulding, K. W. T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390–399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>
- Haynes, R. J., & Mokolobate, M. S. (2001). Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59, 47–63. <https://doi.org/10.1023/A:1009823600950>
- He, Y., Liu, Z., Zhang, J., Wang, H., Shi, J., & Xu, J. (2011). Can assessing for potential contribution of soil organic and inorganic components for butachlor sorption be improved? *Journal of Environmental Quality*, 40(6), 1705–1713. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0340>
- Iturri, L. A. (2015). *Evidencias de acidificación de suelos loésicos agrícolas de Argentina* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional Digital de la Biblioteca Central “Profesor Nicolás Matijevic” de la Universidad Nacional del Sur. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2338>
- Jackson, M. L. (1956). *Soil chemical analysis advanced course: a manual of methods useful for instruction and research in soil chemistry, physical chemistry of soil fertility and soil genesis*. Parallel Press.
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/64c5b05c-f25a-4377-8220-73e6693914c0>
- Jones, B. (1999). *Soil analysis handbook of reference methods*. CRC Press.
- Loaiza Loaiza, Y. P. (2021). *Recuperación de un suelo ácido a partir de la aplicación de enmiendas de cal y humus de lombriz para la productividad de maíz en Coyaima Tolima* [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/fcc6d349-8639-4040-adae-8ace3686b2fe>
- Muhammad, N., Zvobgo, G., & Zhang, G.-P. (2019). A review: the beneficial effects and possible mechanisms of aluminum on plant growth in acidic soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(7), 1518–1528. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61991-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61991-4)
- Raij, B. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. International Plant Nutrition Institute.
- Ramírez Pedroso, J. F., González Cañizares, P. J., Rivera Espinosa, R., & Hernández Jiménez, A. (2021). Response of different *Urochloa* pastures to liming, cultivated in Sabana de Manacas region, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 247–256. <https://cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/1016>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Paramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un Entisol de la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529–541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- SAS Institute Inc. (2002). *User's guide* (Versión 9.1.3). SAS Institute Inc.
- Sela, G. (2021). *Fertilización y riego: teoría y mejores prácticas*. Cropaia. <https://croipaia.com/es/libro-fertilizacion-riego/>
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil survey manual* (Agriculture Handbook No. 18). United States Department of Agriculture.
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la taxonomía de suelos* (12ª ed.). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to soil taxonomy* (13ª ed.). United States Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>

- Sosa-Rodrigues, B. A., & García-Vivas, Y. S. (2020). Contenido y distribución de macronutrientes en rambután en el litoral atlántico de Honduras. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 761–772. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v31i3.40421>
- Tasilla Salazar, L. (2021). *Variación de la reacción del suelo a la aplicación de cal de diferente granulometría en la Encañada - Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4482>
- Terrones Cotrina, Y. (2024). *Efecto de diferentes dosis y fuentes de encalado en las propiedades químicas de un suelo ácido, en el Distrito de Calquis - San Miguel - Cajamarca* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7362>
- Vázquez, M. E., & Millán, G. J. (2017). Acidez del suelo: origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En M. E. Vázquez (Ed.), *Manejo y conservación de suelos en especial énfasis en situaciones argentinas* (pp. 229–271). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Wan, W., Tan, J., Wang, Y., Qin, Y., He, H., Wu, H., Zuo, W., & He, D. (2020). Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: changes in diversity, composition, interaction, and function. *Science of the Total Environment*, 700, Article 134418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134418>
- Yan, L., Riaz, M., Liu, J., Yu, M., & Cuncang, J. (2022). The aluminum tolerance and detoxification mechanisms in plants; recent advances and prospects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(9), 1491–1527. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1859306>