

Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana

pH relationship and nutrient availability for cacao in an Entisol from the Colombian Amazon

Relação entre o pH e a disponibilidade de nutrientes para cacau num entissol da Amazônia colombiana

Gelber Rosas-Patiño,^{*1} Yina Jazbleidi Puentes-Páramo,² Juan Carlos Menjivar-Flores³

¹ Profesor asociado, Universidad de la Amazonia, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Agroecológica. Florencia, Colombia. Correo: g.rosas@udla.edu.co

² Profesora de cátedra, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia. Correo: yjpuentes@unal.edu.co. orcid.org/000-0002-3784-9687

³ Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia. Correo: jcmenjivar@unal.edu.co

Fecha recepción: 28/07/2016

Fecha aprobación: 14/02/2017

Para citar este artículo: Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, 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. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742

* Autor de correspondencia

Resumen

El encalado es una práctica común en el manejo de suelos ácidos, sin embargo, la información sobre encalado en suelos cacaoteros de la Amazonia colombiana es precaria. Se construyeron curvas de incubación en un *Typic Udorthents* fuertemente ácido cultivado con cacao (*Theobroma cacao* L., Malvaceae), para lo cual se utilizaron dosis crecientes (0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 Mg/ha) de cal dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y carbonato de calcio (CaCO_3), con el fin de conocer el tipo y cantidad de material encalante (ME) de mejor reactividad y el que más favorece los cambios en la acidez: pH, Al^{3+} , H^+ y acidez total. Se construyeron los modelos para estimar la dosis de ME

necesaria para llevar el suelo al pH deseado ($\geq 5,5$). Posteriormente se encaló el suelo en condiciones de campo y se evaluó el efecto en pH, Al^{3+} , Al en solución (Al_{sol}), saturación de aluminio (SAI), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la disponibilidad de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, B, Fe y Mn. Los resultados muestran que la mayor reacción de los materiales encalantes en estos suelos se presenta después de 60 días. Aplicaciones de 7 Mg/ha permitieron elevar el pH de 5,5 a 6,0 y disminuir los niveles de Al y Fe, cambios que mejoraron la CIC y la disponibilidad de nutrientes para cacao (Ca, Mg, P, Zn) sin afectar otros nutrientes como N y K.

Palabras clave: encalado, nutrientes, suelo ácido, *Theobroma cacao*

Abstract

Liming is a common practice in acid soil management; however, the information on liming in cacao soils of the Colombian Amazon region is precarious. Incubation curves were built in a highly acid *Typic Udorthents* cultivated with cacao (*Theobroma cacao* L. - Malvaceae), for which increasing doses (0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 Mg/ha) of dolomite lime ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) and calcium carbonate (CaCO_3) were used, in order to establish the type and amount of liming material (ME) with better reactivity, and the one that is better favored with the acidity changes: pH, Al^{3+} , H^+ , total acidity. Models to estimate the ME dose needed to manage the soil in order to

obtain the desired pH (≥ 5.5) were generated. Subsequently, the soil was then limed under field conditions and pH, Al^{3+} , Al in solution (Al_{sol}), aluminum saturation (SAI), cation exchange capacity (CEC) and N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, B, Fe and Mn availability were evaluated. The results show that the greatest reaction of liming materials in these soils occurs after 60 days; applications of 7 Mg/ha allowed to raise the pH from 5.5 to 6.0 and decreases Al and Fe levels. These changes improved the CEC and nutrient availability (Ca, Mg, P, Zn) for cacao without affecting other nutrients such as N and K.

Key words: Liming, Nutrients, Acid soils, *Theobroma cacao*

Resumo

A calagem é uma prática comum no trabalho com solos ácidos; contudo, a informação sobre calagem em solos cacauzeiros da Amazônia colombiana é precária. Foram construídas curvas de incubação num *Typic Udorthents* fortemente ácido cultivado com cacau (*Theobroma cacao* L., Malvaceae), para o qual foram utilizadas doses crescentes (0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 Mg/ha) de calcário dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e carbonato de cálcio (CaCO_3), a fim de conhecer o tipo e a quantidade de material de calagem de melhor reatividade e o que mais favorece as mudanças na acidez: pH, Al^{3+} , H^+ e acidez total. Foram construídos os modelos para estimar a dose de material de calagem

necessária para levar o solo ao pH desejado ($\geq 5,5$). Em seguida, foi feita a calagem do solo em condições de campo e avaliado o efeito em pH, Al^{3+} , Al em solução (Al_{sol}), saturação de alumínio (SAI), capacidade de intercâmbio catiônico (CIC) e a disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, B, Fe e Mn. Os resultados mostram que a maior reação dos materiais de calagem nesses solos se apresenta depois de 60 dias. Aplicações de 7 Mg/ha permitiram elevar o pH de 5,5 a 6,0 e diminuir os níveis de Al e de Fe, mudanças que melhoraram a CIC e a disponibilidade de nutrientes para cacau (Ca, Mg, P, Zn) sem afetar outros nutrientes como N e K.

Palavras chaves: calagem, nutriente, solo ácido, *Theobroma cacao*

Introducción

De las tierras cultivables del mundo, el 40 % son suelos ácidos con pH menor a 5,5 (Đalović et al., 2012), los cuales se localizan particularmente en las regiones de clima tropical. 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, 1994; Ji et al., 2014). En ese sentido, ocurre que una alta proporción de los sitios de intercambio está siendo saturada por Al^{3+} , lo que genera problemas de toxicidad y baja disponibilidad de nutrientes, lo cual afecta la adsorción de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Casierra & Aguilar, 2007).

Para disminuir la acidez del suelo se utiliza material fino de roca caliza (< 0,25 micras) (Álvarez, Viadé, & Fernández-Marcos, 2009), el cual libera al suelo grupos OH^- que reaccionan con el aluminio y el hidrógeno en solución: los neutraliza e incrementa el pH. Además, el calcio aportado desplaza estos elementos de los sitios de intercambio, con lo cual se logra aportar y/o liberar nutrientes retenidos en el suelo (Basak & Biswas, 2016).

A pesar de que el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L., Malvaceae) es originario de la Amazonia, allí predominan suelos ácidos que limitan la disponibilidad y absorción de N, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y P, nutrientes propios de dicha especie (Baligar & Fageria, 2005; Quinteiro et al., 2013). Con respecto a esto, existen reportes sobre el uso benéfico de materiales encalantes (ME) para elevar el valor de pH de los suelos ácidos (Auclerc et al., 2012). Otras investigaciones registran que el crecimiento y la productividad del cacao se incrementan cuando se disminuye la concentración de Al^{3+} , se aumenta el pH de 4,0 a 5,3 y se fertiliza el suelo (Anda, Shamshuddin, & Fauziah, 2013; Da Costa & Sena, 2007).

Sin embargo, la eficiencia del encalado está en función, entre otras variables, de las características pedogenéticas

del suelo y de las condiciones climáticas de la zona (Álvarez, Fernández, Núñez, Seco, & Corti, 2012). Por tanto, esta investigación tiene por objetivo identificar el tipo y la dosis de cal más adecuada para incrementar el valor del pH y evaluar su efecto en la disponibilidad de nutrientes en un suelo *Typic Udorthents* cultivado con cacao en la Amazonia colombiana.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en las instalaciones del Jardín Clonal de cacao de la Asociación Departamental de Productores de Cacao y Especies Maderables del Caquetá (Acamafrut), ubicado en el municipio de Puerto Rico (departamento de Caquetá) a 01° 52' 12" N y 75° 12' 24" W. La zona está clasificada como bosque húmedo tropical (Ruiz, Cárdenas, & Baquero, 2007), con una temperatura media de 25,3 °C, precipitación pluvial media de 2.960 mm/año, brillo solar de 128 horas/mes y humedad relativa de 84 %.

La plantación de cacao utilizada corresponde al clon CCN-51, con siete años de edad y sembrado a 3 m entre plantas y 3 m entre surcos, para una densidad de 1.111 plantas por hectárea. El suelo experimental clasificado como *Typic Udorthents*, con pendientes entre 0 % y 3 %, se muestreó a 30 cm de profundidad para la determinación de las propiedades físicas y químicas (tabla 1).

El suelo presentó una textura franco arcillo arenosa con predominio de gipsitas (>50 %), caolinitas (entre 15 % y 30 %) y trazas de micas y goetitas (<5 %), los cuales poseen altos contenidos de sílice (<5 %), los cuales poseen altos contenidos de sílice y óxidos de hierro y aluminio (Hou, Xu, & Zhao, 2007). Los valores de la Da, Pt, Rp y Hg, fueron de 1,173 Mg/m³, 55,7 %, 1,065 MPa y 25,6 %, respectivamente; estos valores no representan restricciones de tipo físico en el suelo para el desarrollo del cacao.

Tabla 1. Métodos utilizados para la caracterización física y química del suelo

Característica	Unidad	Método
Clase textural	---	Pipeta
Mineralogía	%	Difracción de rayos X
Densidad aparente (Da)	g/cm ³	Método del cilindro
Porosidad total (Pt)		Relación densidad real y aparente
Humedad gravimétrica (Hg) a capacidad de campo	%	Ollas de Richard
Resistencia a la penetración (Rp)	MPa	Penetrómetro de mano
pH en agua (1:2)	---	Potenciométrico
Aluminio total (Al _t)	%	Absorción atómica
Aluminio intercambiable (Al _{int})	Cmol (+)/kg	Volumetría
Cadmio (Cd)	ppm	Extracción con DTPA

Fuente: Instituto Agustín Codazzi (2006)

Selección del material encalante por incubación del suelo

Los materiales utilizados fueron cal agrícola (CaCO₃) con 85 % de pureza y cal dolomita (CaMg(CO₃)₂) con 55 % de CaCO₃ y 33 % de MgCO₃ en cantidades de 0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 Mg/ha. Los ME comerciales cumplieron con los requerimientos de las normas técnicas colombianas NTC 32 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1991) y NTC 326 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1969) para ser utilizadas como enmiendas. Una vez mezclado el suelo y las dosis de cal, este se llevó a la capacidad de campo y se cubrió con plástico para evitar pérdida de agua por evaporación. Cada diez días se reponían las pérdidas de humedad como lo sugiere Pérez (1986). Los 14 tratamientos (7 dosis por dos ME) se organizaron en un diseño estadístico completamente al azar con cuatro repeticiones, donde cada unidad experimental consistió en una maceta plástica de 1,5 kg de suelo seco al aire.

Durante 76 días se tomaron muestras de suelo (cada 10 días) en cada unidad experimental para monitorear el comportamiento del pH —como lo sugiere Zapata (2004)— y encontrar el equilibrio de reactividad (E_r). Se entiende por E_r el tiempo requerido para obtener lecturas estables de pH en un proceso de incubación de suelo con ME (Castro, Gómez, Munévar, & Hernández, 2006; Osorno, 2012). Luego de este tiempo, se tomaron muestras de suelo en cada maceta para determinar el efecto de los ME sobre el pH en agua en relación 1:2 por el método potenciométrico: acidez total (A_t) y acidez intercambiable (Al³⁺ + H⁺) por volumetría.

El análisis estadístico consistió en la construcción de líneas de dispersión entre medias para Al_{int}, H_{int} y A_t, y en la construcción de regresiones lineales para pH, con las cuales se realizaron las curvas de incubación, a fin de hallar el modelo que permitiera conocer el tipo y la cantidad de ME más adecuados para llevar el suelo a pH ≥ 5,5.

Evaluación en campo del material encalante

De acuerdo con los resultados del modelo de incubación para la selección del ME, se determinó la aplicación de 7 Mg/ha de cal dolomítica, lo cual permitió llevar el suelo a un pH entre 5,5 y 6,0. Para esta fase se utilizó un diseño estadístico completamente al azar con dos tratamientos (con y sin cal dolomita) y tres repeticiones, donde la unidad experimental estuvo conformada por seis árboles del clon CCN-51.

Las aplicaciones se realizaron al inicio de la época lluviosa, encalando la zona del plato de los árboles de cacao en forma homogénea con la ayuda de un cernidor. Después de 90 días de haber encalado, se tomaron tres muestras de suelo por tratamiento, compuestas por cuatro submuestras equidistantes, a un metro de distancia del tallo y a 30 cm de profundidad (Sadeghian, 2011). Se determinó pH y Al_{int} por los métodos descritos en la tabla 1; Al en solución (Al_{sol}) en mg/kg por extracción con DTPA; saturación de aluminio intercambiable (SAI); materia orgánica (MO) por Walkley-Black; nitrógeno total (N_t) por Kjeldahl; P en mg/kg por Bray II modificado; K, Ca, Mg, Na y CIC en $Cmol(+)/kg$ por acetato de amonio 1; N, Mn, Fe, Zn y Co en mg/kg por extracción con DTPA; y B en mg/kg por extracción en agua caliente.

El análisis estadístico consistió en un análisis comparativo de las medias con el test de Student sobre la disponibilidad de nutrientes del suelo con y sin cal dolomita. Así mismo, se hicieron correlaciones entre variables a partir de la prueba de Pearson mediante el uso del programa Statistical Analysis System SAS® 9.4 (SAS, 2014).

Resultados y discusión

Efecto de dos tipos de cal en la acidez del suelo

Los dos ME presentaron un comportamiento similar durante la incubación: se obtuvo un incremento gradual del pH con el aumento de la dosis de cal y ambos alcanzaron el E_r luego de 60 días después del encalado (figura 1).

El E_r de los ME fue mayor al tiempo de espera recomendado por la casa comercial para realizar la siembra (30 días después del encalado) y mayor a los 30 días sugeridos por Osorno y Osorno (2010) como tiempo requerido para conocer la reacción de la cal. Gómez y Narváz (1999) encontraron cambios significativos en la acidez del suelo a los 54 días de incubados los ME. Sin embargo, Osorno (2012) considera que el poder de neutralización y reacción de una cal se expresa en forma integral a los tres meses. El comportamiento de E_r pudo estar más asociado, en este caso, al tipo de arcilla (caolinita y gibsitita) y al ambiente pedogenético (Al-Mukhtar, Lasledj, & Alcover, 2014).

La A_t y el Al_{int} disminuyeron significativamente con aplicaciones de 1 Mg/ha de los ME probados (figuras 2a y 2b); no se encontraron diferencias entre los tipos de cal. El H_{int} se neutralizó con aplicaciones mayores a 7 Mg/ha de cal dolomita (figura 2c), esto se debe a que la acidez intercambiable del suelo en estudio depende más del H^+ proveniente de la hidrólisis de los compuestos de Fe y Mn o de la mineralización de la materia orgánica que de la presencia de Al_{int} (Fassbender & Bornemisza, 1994).

Este suelo se caracteriza por el poco desarrollo pedogenético y, el bajo contenido de material parental inalterado (Grossman, 1983). En este suelo predominan arcillas como la gibsitita ($Al(OH)_3$) y la caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), las cuales presentan alto contenido de aluminio, pero en estado cristalino e insoluble (Gérard, 2016). En este caso, la gibsitita puede provenir del material parental, mientras que la caolinita puede corresponder a material neoforado a partir de procesos pedogenéticos propios de suelos con bajo pH (Martí, Gámiz, Bech, & Delgado, 2004).

El pH del suelo presentó un comportamiento ascendente con el incremento de las dosis de los dos ME (figura 2d), de forma similar a los resultados reportados por Guckland et al. (2012). Así mismo, el suelo presentó resistencia al cambio de pH, comportamiento propio de suelos con altos contenidos de arcillas, óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso, los cuales le confieren al suelo un fuerte poder *buffer* (He, Liu, Zhang, Wang, Shi,

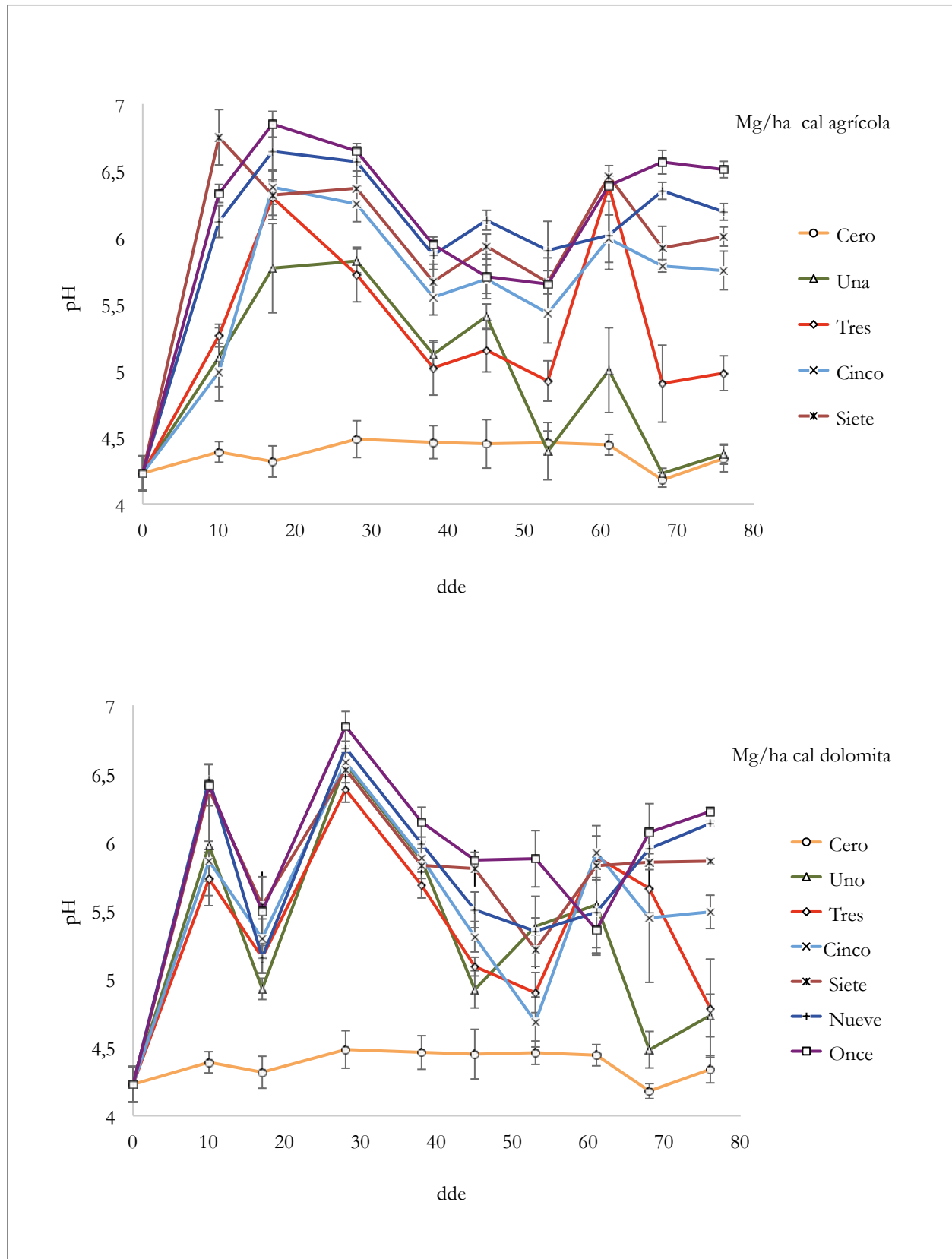


Figura 1. Equilibrio de reactividad del pH del suelo con dos tipos de cal y diferentes dosis. dde: días después del encalado. Fuente: Elaboración propia

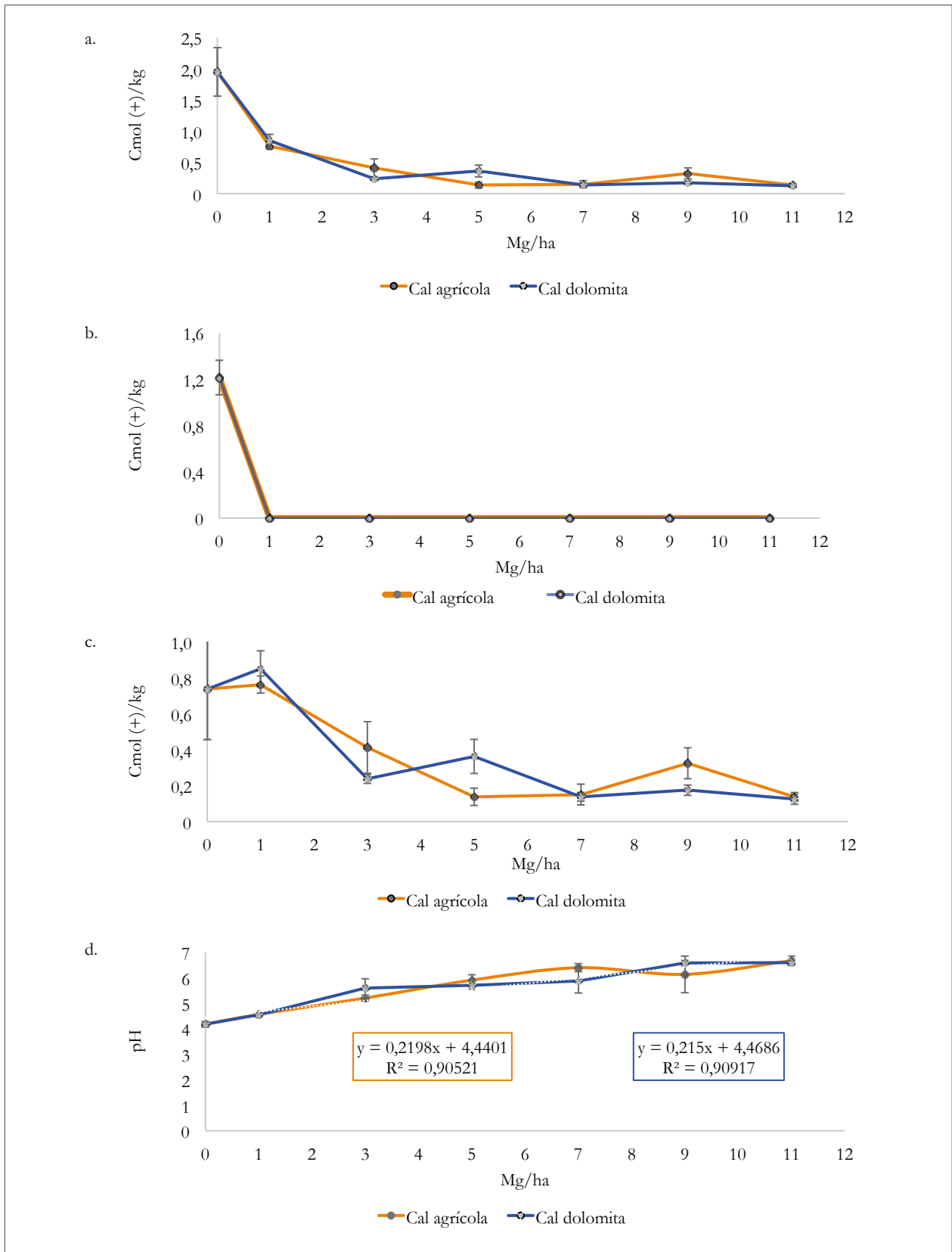


Figura 2. Efecto de los materiales encalantes sobre: a. Acidez total (A_t); b. Aluminio intercambiable (Al_{int}); c. Hidrógeno intercambiable (H_{int}); d. pH.

Fuente: Elaboración propia

& Xu, 2011), lo que requiere la aplicación de más de 4 Mg/ha. Para llegar a pH entre 5,5 y 6,0 fueron necesarios 7 Mg/ha, resultados que superan los reportados por Castro y Munevar (2013), quienes encontraron que, para llevar un suelo con horizonte óxico de pH 4,5 a 5,5, se requieren alrededor de 4 Mg/ha de CaCO_3 .

La dosis de cal agrícola y cal dolomítica se determinó a partir de las ecuaciones generadas en el modelo (figura 2d), y se concluyó que con la aplicación de 7 Mg/ha de ME es posible neutralizar el H_{int} y alcanzar valores de pH entre 5,5 y 6,0. Sin embargo, al aplicar cal dolomita se incorporó Mg^{2+} y esto

contribuye a mantener el equilibrio de la relación Ca:Mg del suelo (Zapata & Restrepo, 2010).

Cambios en el pH y su efecto en las propiedades químicas del suelo

Los resultados muestran que hay diferencias significativas en la disponibilidad de nutrientes del suelo por efecto de los tratamientos (tabla 2). Los indicadores de acidez del suelo (pH, acidez intercambiable y SAI) disminuyeron ($p \leq 0,01$) por efecto del encalado, al igual que los niveles de Fe y Al_{sol} . Álvarez et al. (2009) encontraron que a $\text{pH} \geq 5,5$, las concentraciones de Al_{int} , Al_{sol} y Fe son casi imperceptibles.

Tabla 2. Degradación de diferentes organofosforados por diferentes microorganismos

Variable	Medias		Valor p
	Sin cal	Con cal	
pH	4,36±0,144	5,91±0,104	0,000113**
Al_{int}	1,45±0,354	0,00±0,000	0,004416**
Al_{sol}	89,30±8,224	0,00±0,000	0,000047**
SAI	53,90±20,044	0,00±0,000	0,009606**
Mn	19,10±9,588	15,57±2,524	0,559423 ^{NS}
Fe	102,84±22,402	32,52±3,065	0,009978**
CIC	4,67±0,219	5,38±0,113	0,026585*
MO	1,92±0,262	2,67±0,423	0,115971 ^{NS}
N_t	0,13±0,024	0,08±0,043	0,216208 ^{NS}
K	0,11±0,007	0,08±0,010	0,057669 ^{NS}
Ca	0,65±0,642	4,49±0,562	0,001459**
Mg	0,14±0,104	2,99±0,192	0,000023**
P	3,89±0,948	9,53±1,379	0,041360*
Zn	1,16±0,207	4,34±0,413	0,000284**
Cu	1,69±0,078	0,92±0,056	0,000958**
B	0,74±0,276	0,19±0,046	0,035486*

* Diferencias significativas con $p \leq 0,05$.

** Diferencias altamente significativas entre medias de acuerdo con la prueba Student con $p \leq 0,01$.

^{NS} Diferencias no significativas con $p > 0,05$.

Fuente: Elaboración propia

Con relación a Mn, es conocido que concentraciones superiores a 10 y 12 μ moles de Al y Mn reducen en más del 20% la producción de biomasa en cacao, mientras que cantidades mayores a 0,4 Cmol(+)/kg de Al_{int} afectan su crecimiento hasta en un 60% (Shamshuddin, Anda, Fauziam, & Syed Omar, 2011).

Las bases (Ca y Mg) presentaron un incremento altamente significativo ($p \leq 0,01$) y la CIC también aumentó ($p \leq 0,05$); caso contrario se presentó para el K, el cual presentó una leve disminución en su concentración. Similares resultados obtuvieron Sikiric et al. (2011) con la aplicación de 9 Mg/ha de cal dolomita en un suelo inceptisol, con lo cual aumentó la disponibilidad de Ca y Mg sin que se lograran cambios significativos en los niveles de K. Esto se puede explicar porque que el Mg (y el Ca en menor medida) reemplaza al K en el complejo de cambio (Chatzistathis, Alifragis, & Papaioannou, 2015). No se encontró efecto significativo del encalado sobre el N, el cual, en este suelo, es aportado por la materia orgánica; estos resultados concuerdan con los reportados por Caire, Haliski, Bini, & Scharr (2015), quienes manifestaron que la incorporación de cal en la superficie del suelo no afecta las tasas anuales de nitrógeno.

Los niveles de P y Zn también se incrementaron ($p \leq 0,05$ y $p \leq 0,01$, respectivamente) pero B y Cu disminuyeron ($p \leq 0,05$ y $p \leq 0,01$, respectivamente). Anikwe, Eze, y Ibudialo (2016) encontraron incrementos en la disponibilidad de P en suelos oxisoles, con aplicaciones de 5 Mg/ha; este aumento en las concentraciones de P y Zn favorecen la producción de biomasa en cacao (Rodrigues, Guedes

de Carvalho, & Melo, 2003). En suelos ácidos, las altas concentraciones de Fe y Mn afectan la disponibilidad de Zn (Marcano, Rodríguez, & Mohsin, 2003). Cuando el pH se incrementa, el Fe y el Cu descienden, pero el Zn se sostiene hasta valores de pH cercanos a 5,5, lo cual es similar a lo obtenido por Ordóñez, Kheraiwish, Polo, Giráldez, & González (2005). La reducción en la disponibilidad de Cu y B en el suelo es apreciable cuando se incrementa el pH por encima de 5,4, como lo sugieren Lehto (1995) y Ambrosini et al. (2015).

Algunas variables presentaron correlación significativa, como se evidencia en la tabla 3. Así, las variables Al_{sol} y SAI disminuyeron a medida que se elevó el pH, mientras que Ca, Mg y Zn aumentaron ($p \leq 0,01$). Por cada mol de $CaMg(CO_3)_2$ incorporado, se neutralizan 2 moles de H^+ y se precipitan dos moles de aluminio intercambiable en forma de $Al(OH)_3$; esta reacción explica además las correlaciones SAI frente a Al_{int} ($p \leq 0,05$) y SAI frente a Al_{sol} ($p \leq 0,01$), propias de suelos ácidos (Li & Johnson, 2016).

Del mismo modo, al disminuir el Al_{int} y aumentar el Ca y el Mg intercambiable, la SAI disminuye, como lo corroboran Moore, Ouimet, & Duchesne (2012). Se presentaron correlaciones positivas para el Cu frente al K ($p \leq 0,01$) y para el Cu frente al B ($p \leq 0,05$), debido a que estos elementos disminuyeron por efecto del encalado. El Zn aumenta su disponibilidad a medida que el pH, el Ca y el Mg se incrementan. También el Al_{sol} y el SAI ($p \leq 0,01$) aumentan, como se aprecia en la tabla 3, efecto que pudo presentarse por la disminución del Fe y el Mn, como se explicó anteriormente.

Tabla 3. Correlaciones entre las propiedades químicas de un suelo con y sin aplicación de cal dolomita

	pH	Al _{int}	Al _{sol}	SAI	K	Ca	Mg	Zn	Cu	B
pH	1									
Al _{int}	-0,7542	1								
Al _{sol}	-0,9840**	0,7121	1							
SAI	-0,9528**	0,8979**	0,9104*	1						
K	0,22511	-0,5676	-0,0872	-0,4771	1					
Ca	0,9766**	-0,6329	-0,9434**	-0,8990*	0,2127	1				
Mg	0,9893**	-0,6692	-0,9928**	-0,9003*	0,0874	0,9732**	1			
Zn	0,9924**	-0,6910	-0,9737**	-0,9218**	0,1746	0,9872**	0,9898**	1		
Cu	-0,0734	-0,3645	0,2257	-0,1921	0,9261**	-0,0711	-0,2144	-0,1065	1	
B	-0,4159	0,1002	0,5518	0,2023	0,7458	-0,3527	-0,5231	-0,4274	0,8774*	1

* Correlaciones significativas con $p \leq 0,05$.

** Correlaciones altamente significativas con $p \leq 0,01$ mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En el suelo *Typic Udorthents* de la Amazonia colombiana estudiado, el aluminio y el hidrógeno intercambiables pueden ser neutralizados con la aplicación de 7 Mg/ha de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$: en un tiempo de reacción aproximado de dos meses, se alcanzaron cambios en el pH de 4,36 a 6,0, con lo cual se logró incrementar la disponibilidad de nutrientes para el cacao, tales como Ca, Mg, P y Zn, y se disminuyó la disponibilidad de Al, Fe y Mn.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Asociación Departamental de Productores de Cacao y Especies

Maderables del Caquetá (Acamafrut) y a la Universidad de la Amazonia por su apoyo para realizar esta investigación. Así mismo, agradecen al ingeniero agroecólogo Rigoberto Torres, a la ingeniera Claudia Lorena Castro, al doctor Jaime Enrique Velázquez y al doctor Édgar Álvaro Ávila por su colaboración. También a los revisores pares por sus comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Descargos de responsabilidad

Los autores están de acuerdo con la publicación del presente artículo y declaran que no existe ningún conflicto de interés que afecte los resultados.

Referencias

- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2014). Lime consumption of different clayey soils. *Applied Clay Science*, 95, 133-145.
- Álvarez, E., Fernández, M., Núñez, A., Seco, N., & Corti, G. (2012). Aluminium fractionation and speciation in bulk and rhizosphere of a grass soil amended with mussel shells or lime. *Geoderma*, 173, 322-329.
- Álvarez, E., Viadé, A., & Fernández-Marcos, M. L. (2009). Effect of liming with different sized limestone on the forms of aluminium in a Galician soil (NW Spain). *Geoderma*, 152(1-2), 1-8.
- Ambrosini, V. G., Rosa, D. J., Corredor, J. P., Borghezani, M., Bastos de Melo, G. W., Fonseca de Sousa, C. R., ... Brunetto, G. (2015). Reduction of copper phytotoxicity by liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 270-280.
- Anda, M., Shamshuddin, J., & Fauziah, C. I. (2013). Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research*, 132, 1-11.
- Anikwe, M. A., Eze, J. C., & Ibudialo, A. N. (2016). Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani Enugu Southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 158, 32-38.
- Auclerc, A., Nahmani, J., Aran, D., Baldy, V., Callot, H., Gers, C., ... Guerold, F. (2012). Changes in soil macroinvertebrate communities following liming of acidified forested catchments in the Vosges Mountains (North-eastern France). *Ecological Engineering*, 42, 260-269.
- Baligar, V. C., & Fageria, N. K. (2005). Soil aluminum effects on growth and nutrition of cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(5), 709-713.
- Basak, B., & Biswak, D. (2016). Potentiality of Indian rock phosphate as liming material in acid soil. *Geoderma*, 263, 104-109.
- Caires, E., Haliski, A., Bini, A., & Scharr, D. (2015). Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy*, 66, 41-53.
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257.
- Castro, H., Gómez, M., Munévar, O., & Hernández, D. (2006). Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación. *Agronomía Colombiana*, 24(1), 122-130.
- Castro, H., & Munevar, O. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 409-416.
- Chatzistathis, T., Alifragis, D., & Papaioannou, A. (2015). The influence of liming on soil chemical properties and on the alleviation of manganese and copper toxicity in *Juglans regia*, *Robinia pseudoacacia*, *Eucalyptus sp.* and *Populus sp.* plantations. *Journal of Environmental Management*, 150, 149-156.
- Da Costa, M. I., & Sena, S. (2007). Calagem e adubação potássica na produção do cupuaçuzeiro em sistemas agroflorestais da Amazônia Ocidental. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(7), 957-963.
- Đalović, G., Jocković, D. S., Dugalić, G. J., Bekavac, G. F., Purar, B., Šeremešić, S. I., & Jocković, M. D. (2012). Soil acidity and mobile aluminum status in pseudogley soils in Čačak-Kraljevo basin. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 77(6), 833-843.
- Fassbender, H., & Bornemiza, E. (1994). *Química de suelos: con énfasis en América Latina* (2.ª Ed.). San José, Costa Rica: IICA.
- Gérard, F. (2016). Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. *Geoderma*, 262, 213-226.
- Gómez, C., & Narváez, C. (1999). Efecto de tres enmiendas orgánicas y de la cal sobre la disponibilidad y adsorción de fósforo en un suelo ácido. *Revista Colombiana de Química*, 28(2), 59-67.
- Grossman, R. B. (1983). Entisols. *Developments in Soil Science*, 11, 55-90.
- Guckland, A., Ahrends, B., Paar, U., Dammann, I., Evers, J., Karl, J., ... Eichhorn, J. (2012). Predicting depth translocation of base cations after forest liming: results from long-term experiments. *European Journal of Forest Research*, 131(6), 1869-1887.
- 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.
- Hou, T., Xu, R., & Zhao, A. (2007). Interaction between electric double layers of kaolinite and Fe/Al oxides in suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 297(1-3), 91-94.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (1969). *Norma Técnica Colombiana (NTC) 326. Abonos o fertilizantes. Métodos de ensayo de granulometría en seco*. Bogotá, Colombia: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (1991). *Norma Técnica Colombiana (NTC) 32 Tejido de alambre y tamicas para propósitos de ensayo*. Bogotá, Colombia: Icontec.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 6ª ed. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Ji, C., Yang, Y., Han, W., He, Y., Smith, J., & Smith, P. (2014). Climatic and edaphic controls on soil pH in alpine grasslands on the Tibetan Plateau, China: A quantitative analysis. *Pedosphere* 24(1), 39-44.

- Lehto, T. (1995). Boron retention in limed forest mor. *Forest Ecology and Management*, 78(1-3), 11-20.
- Li, W., & Johnson, C. E. (2016). Relationships among pH aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States. *Geoderma*, 271, 234-242.
- Marcano, A. E., Rodríguez, J. C., & Mohsin, M. (2003). Efecto del azufre elemental sobre el pH y la solubilidad de algunos nutrimentos en fosfocomposts. *Interciencia*, 28(9), 504-511.
- Martí, J. M., Gámiz, E., Bech, J., & Delgado, R. (2004). Are Mediterranean mountains Entisols weakly developed? The case of Orthents from Sierra Nevada (Southern Spain). *Geoderma*, 118(1-2), 115-131.
- Moore, J. D., Ouimet, R., & Duchesne, L. (2012). Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application. *Forest Ecology and Management* 281, 130-139.
- Ordóñez, R., Kheraiwish, D., Polo, M. J., Giráldez, J. V., & González, P. (2005). Influencia del encalado sobre la movilidad de metales en un suelo contaminado en el valle del río Guadamar (Sevilla). *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, 7, 29-32.
- Osorno, H. (2012). *Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Osorno, H., & Osorno, L. (2010). Determinación de los requerimientos de cal. *Suelos ecuatoriales*, 41(1), 29-35.
- Pérez, R. (1986). Efectos del encalado en la neutralización del aluminio intercambiable y sobre el crecimiento del tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Agronomía Tropical*, 36(1-3), 89-110.
- Quinteiro, M., Furtado, A., Schramm, M., Pinto, F., Viana, M., & Baligar, V. C. (2013). Aluminum effects on growth photosynthesis and mineral nutrition of cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 36(8), 1161-1179.
- Rodrigues, A., Guedes de Carvalho, J., & Melo, P. C. (2003). Efeito do fósforo e do zinco sobre o crescimento de mudas do cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum* Schum.). *Cerne*, 9(2), 221-230.
- Ruiz, J., Cárdenas, W., & Baquero, C. (2007). Cambio de la cobertura boscosa como sucedáneo de la dinámica colonizadora en el departamento del Caquetá 1986-2000. *Revista de Investigación Universidad de la Salle*, 7(1), 95-104.
- Sadeghian, S. (2011). Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 64(1), 5781-5791.
- SAS. (2014). User's guide: Statistics. Release 9.4. Cary, EE. UU.: Statistical Analysis System STAT Software.
- Shamshuddin, J., Anda, M., Fauziam, C. I., & Syed Omar, S. R. (2011). Growth of cocoa planted on highly weathered soil as affected by application of basalt and/or compost. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(22), 2751-2766.
- Sikiric, B., Cakmak, D., Saljnikov, E., Mrvic, V., Jakovljevic, M., Stajkovic, O., & Bogdanovic, D. (2011). Optimization of macroelement contents in raspberry leaves by liming in an extremely acid soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(1), 329-337.
- Zapata, R. (2004). Química de la acidez del suelo. [Documento de trabajo]. Bdigital, Repositorio Institucional UN. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Zapata, R., & Restrepo, F. (2010). Efecto de la adición de cal y yeso como correctores del aluminio en el suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 36-45.