

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA ADSORCIÓN DE CATIONES INTERCAMBIABLES EN ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA¹

Siavosh Sadeghian Khalajabadi*, Raúl Darío Zapata Hernández**

RESUMEN

SADEGHIAN K., S.; ZAPATA H., R. D. Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. Revista Cenicafé 63 (2): 79-89. 2012

La cantidad y el tipo de catión que puede retener un suelo dependen de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. El siguiente estudio tuvo como objetivo determinar el efecto de algunas características del suelo sobre la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. Para ello se tomaron muestras del horizonte A en 14 unidades cartográficas de suelos, contrastantes en su origen y mineralogía. En todos los suelos se encontró el siguiente orden “natural” para retener las bases de cambio: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, mientras que el Al^{3+} disminuyó con el incremento del pH, hasta alcanzar valores menores a $1,0 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ cuando éste era mayor a 5,1. Se encontró una correlación positiva entre Ca^{2+} y Mg^{2+} , más no entre éstos y K^+ o Na^+ . La CIC, determinada mediante el acetato de amonio molar y neutro, presentó una alta dependencia con respecto al contenido del carbono orgánico (CO), más no fue una medida de la capacidad real del suelo para retener los cationes de cambio. En suelos con $\text{CO} < 5\%$, la fracción arcilla mostró ser un buen reservorio para la retención de los cationes intercambiables; sin embargo, no se halló relación alguna entre esta variable y la CIC, y sólo para algunas unidades de suelos se pudo establecer cierta relación entre la mineralogía de los suelos y el contenido de elementos objeto de estudio.

Palabras clave: Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC, textura, materia orgánica del suelo, mineralogía, acidez.

ABSTRACT

The quantity and type of cation that the soil can retain depend on its physical, chemical and mineralogical properties. The objective of the following study was to determine the effect of some of the characteristics of soil on the adsorption of exchangeable cations in some soils of the coffee zone of Colombia. For this, samples of horizon A were taken in 14 cartographical units of soil with different origin and mineralogy. In all of the soils the following “natural” order to retain the bases of change was found: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, while the Al^{3+} diminished with the increment of pH until reaching values under $1.0 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, when it was higher than 5,1. A positive correlation was found between Ca^{2+} and Mg^{2+} , but not between them and K^+ or Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ . The CEC determined by molar and neutral ammonium acetate, presented a high dependency to the organic carbon (OC) content, although it wasn't a measure of the real capacity of the soil to retain the cations of change. In soils with $\text{OC} < 5\%$, the fraction clay showed to be a good reservoir for the retention of the exchangeable cations; nonetheless, no relation between these variables and the CEC was found, and only for some units of soils it was possible establish some relation among the mineralogy of the soils and the content of the elements studied.

Keywords: Cation Exchange Capacity-CEC, texture, soil organic matter, mineralogy, soil acidity.

¹ Fragmento de la tesis “Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona colombiana sobre la nutrición del café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo”, presentado por el primer autor para optar al título de Doctor en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional sede Medellín.

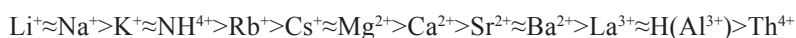
* Investigador Científico II. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Las cargas de la fracción coloidal del suelo son el mayor reservorio de nutrientes para las plantas a corto y mediano plazo (2, 11, 17). El estudio de éstas y su distribución es de fundamental importancia para entender los diferentes fenómenos físicos y químicos que ocurren en el suelo, pues la mayoría de las reacciones electroquímicas que influyen la fertilidad de los suelos y, consecuentemente, la nutrición de las plantas, tienen lugar en la superficie de los constituyentes de la fracción orgánica y mineral (1).

La carga superficial depende tanto de los componentes del suelo (minerales silicatados de la fracción arcilla, materia orgánica, óxidos de Fe y de Al, y alófanos), como la fuerza iónica y el pH de la solución del suelo, además de la adsorción específica (1). En cuanto a su naturaleza y distribución se refiere, para la mayoría de los suelos agrícolas las cargas negativas prevalecen sobre las positivas, de allí la mayor importancia que reviste la Capacidad de Intercambio Catiónico-CIC con respecto a la Capacidad de Intercambio Aniónico-CIA (11).

Los cationes adsorbidos por el complejo de cambio pueden ser desplazados por



Con respecto a los suelos que cubren la zona cafetera de Colombia, por lo general se cumple el siguiente orden: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (14), en tanto que los contenidos del Al^{3+} guardan una relación estrecha con el pH del suelo (21, 22).

Uno de los problemas a los que diariamente se enfrentan muchos investigadores, profesionales químicos a cargo de los laboratorios, los asistentes técnicos y los agricultores es disponer de metodologías analíticas que correlacionen de manera

otros como consecuencia de diversos factores, a saber: la fuerza de adsorción del ión, su predominancia y concentración en la solución del suelo, la presencia de otros cationes en la solución y la selectividad del catión, entre otros. El anterior proceso, caracterizado por ser reversible, estequiométrico y rápido, se denomina intercambio catiónico (4, 9). La adsorción preferencial de los cationes, es decir, su selectividad, depende básicamente de la naturaleza y la cantidad de los componentes inorgánicos y orgánicos, además del potencial iónico (16, 25).

En general, existe una relación directa entre la valencia del ión y la fuerza con que es retenido por los sitios de intercambio; en este sentido, los cationes trivalentes se adsorben más firmemente que los bivalentes, y éstos a su vez son retenidos con más fuerza que los monovalentes. Adicionalmente, entre los cationes de igual carga, aquel con menor radio de hidratación o potencial iónico presenta una adsorción más firme (9, 25). La facilidad con la que se puede reemplazar un ión por otro se ha denominado serie liotrópica; un ejemplo de ello, dado por Bohn *et al.* (4) es:

confiable las propiedades del suelo con su fertilidad, y por ende, con la nutrición de las plantas (18). Al respecto, la pertinencia del uso de la CIC, como estimador de la cantidad de cationes que puede retener el suelo, ha sido frecuentemente puesta en tela de juicio, dada la sobreestimación de su valor en suelos de carga variable (5, 9). Lo anterior como consecuencia del extractante que comúnmente se emplea para determinarla, es decir, el acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) molar (1 M) y neutro (pH=7,0) (11). Fauziah *et al.* (10), luego

de evaluar siete métodos para determinar la CIC, concluyeron que para suelos ácidos tropicales de carga variable, las soluciones tamponadas como el acetato de amonio (pH=7,0), son las que más sobreestiman la CIC.

El siguiente estudio tuvo como objetivo determinar el efecto de algunas características del suelo sobre la adsorción de cationes intercambiables en suelos de la zona cafetera de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo entre mayo y diciembre de 2008 en los laboratorios de la Disciplina de Suelos del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, ubicado en el municipio de Manizales (Caldas), a 5°0' de latitud Norte, 75°36' longitud Oeste y una altitud de 1.310 m, con temperatura media de 21,7°C y precipitación anual de 3.000 mm.

Con base en la información disponible en la Disciplina de Suelos de Cenicafé, se seleccionaron 14 unidades cartográficas de suelos, caracterizadas por su diversidad en origen, mineralogía y la cobertura en el área sembrada con café (Tabla 1). En cada unidad de suelo se seleccionó un lote de café a plena exposición solar, en donde se ubicaron cinco puntos de muestreo en un área aproximada de 100 m². En cada punto se recolectó 1,0 kg de suelo a 25 cm de profundidad del horizonte A, con el fin de conformar una muestra compuesta. Cuando el espesor del horizonte A era inferior al valor en referencia, se tomaron como límite la profundidad de este horizonte.

Los suelos se secaron al aire durante 10 días, tiempo después del cual se homogeneizaron, se pasaron por tamiz de 2 mm y se realizó la siguiente caracterización de sus propiedades químicas en los laboratorios de Cenicafé, de acuerdo con las metodologías descritas por Carrillo

Tabla 1. Ubicación e información general de las unidades cartográficas del suelo.

No.	Departamento	Municipio	Unidad de suelo	Material parental	Taxonomía*
1	Tolima	Líbano	Líbano	Cenizas volcánicas	Melanudands
2	Risaralda	Pereira	Chinchiná	Cenizas volcánicas	Melanudands
3	Caldas	Chinchiná	Chinchiná	Cenizas volcánicas	Fulvudands
4	Antioquia	Venecia	Chinchiná	Cenizas volcánicas	Melanudands
5	Cauca	Timbío	Timbío	Cenizas volcánicas	Melanudands
6	Tolima	Marquetalia	Fresno	Cenizas volcánicas	Fulvudands
7	Quindío	Quimbaya	Quindío	Cenizas volcánicas	Hapludands
8	Tolima	Ibagué	San Simón	Granito biotítico	Dystrudepts
9	Santander	Floridablanca	Paujil	Gneiss biotítico	Dystrudepts
10	Valle del Cauca	Jamundí	Doscientos	Basalto	Dystrudepts
11	Valle del Cauca	Sevilla	Doscientos	Basalto	Eutrodepts
12	Antioquia	Fredonia	Suroeste	Aglomerados	Dystrudepts
13	Antioquia	Fredonia	Salgar	Pizarra	Dystrudepts
14	Huila	Gigante	Guadalupe	Arenisca	Dystrudepts

* A nivel de gran grupo según USDA.

(6): pH (método potenciométrico–relación suelo:agua desionizada 1:1 p/p), carbono orgánico (Walkley–Black), N (método Semimicro Kjeldahl), CIC (Ac. de amonio 1,0 M, pH=7,0), P (extracción con Bray II), Ca, Mg, K y Na (extracción con Ac. de amonio 1M a pH 7,0), Al (extracción con KCl 1,0 M) y S (método turbimétrico, extracción con fosfato monocálcico 0,008 M). La distribución del tamaño de partículas se realizó por el método de Bouyucos y se analizó la mineralogía de los suelos por difracción de rayos X en el respectivo laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Se utilizaron diferentes modelos de regresión para evaluar las relaciones entre las variables evaluadas, determinando la significancia de cada parámetro de la ecuación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentó una alta variación tanto en las propiedades físicas y químicas (Tabla 2) como mineralógicas evaluadas (Tabla 3), comportamiento que dio cumplimiento al propósito de seleccionar unidades cartográficas contrastantes. En general, los suelos derivados de cenizas volcánicas, como era de esperarse, exhibieron mayores contenidos de carbono orgánico (CO) y N total, mientras que sus niveles de P, Fe y Mn fueron los más bajos; siendo la unidad Chinchiná, en el municipio de Chinchiná, la excepción para el P. Una acumulación más alta de CO en los suelos con influencia de cenizas, se relaciona con su mayor resistencia a la mineralización; esto en respuesta a la presencia de la alófana como mineral predominante (13, 27). Lo anterior, como se discutirá más adelante, tiene implicaciones sobre la CIC, propiedad que ejerce influencia directa en la dinámica de los cationes en el suelo.

En cuanto a los cationes intercambiables se refiere, se presentó el siguiente orden en todas las unidades analizadas, sin que hubiera una tendencia que permitiera relacionar su contenido con respecto al origen de los suelos: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+}$. El orden registrado sigue la serie liotrópica que indica la preferencia general de los suelos (4, 25).

Henao (14), quien trabajó con diversos suelos de la zona cafetera de Colombia, también reporta al Ca^{2+} como catión predominante en la zona objeto de estudio, en tanto que los contenidos de Mg^{2+} no siempre fueron mayores que los de K^{+} ; con respecto al Na^{+} , su concentración estuvo por debajo de $0,1 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$. Las unidades Timbío y Paujil se caracterizaron por su mayor contenido de cationes (mayor de $7,0 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$); San Simón, Salgar, Doscientos en Sevilla (Valle del Cauca), Quindío, Líbano y Chinchiná en Pereira (Risaralda) presentaron valores intermedios (entre $2,5$ y $5,2 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$), y las demás exhibieron contenidos inferiores a $2,0 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$.

En siete de los suelos el pH fue bajo para café (menor de 5,0), de acuerdo a lo sugerido por Sadeghian (23), y se encontró una relación inversa entre esta variable y los contenidos de Al^{3+} (Figura 1), cuyo valor más elevado se encontró en la unidad Suroeste ($7,8 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$). De acuerdo con un estudio realizado por Sadeghian (22) en 27 localidades de la zona cafetera del país, la concentración de Al^{3+} se reduce conforme al aumento del pH hasta llegar a niveles inferiores a $1,0 \text{ cmol}_{c} \cdot \text{kg}^{-1}$ para valores superiores a 5,0. Havlin *et al.* (11) y Zapata (26) reportan un comportamiento similar; estos autores aseguran que para valores de pH superiores a 5,0–5,5 se corrigen los problemas de la acidez ocasionados por el Al^{3+} . Pese a lo expuesto, el estudio desarrollado por Ortiz *et al.* (20) sugiere

Tabla 2. Propiedades químicas y físicas de los suelos utilizados en el estudio.

No.	Unidad de suelo- Procedencia	pH	—(%)—			(mg.kg ⁻¹)			—(cmol _c .kg ⁻¹)—					—(%)—			Textura
			CO	N	P	S	Ca	Mg	K	Na	Al	CIC	CICE	Ar	L	A	
1	Libano	5,1	10,4	0,62	11	7,6	2,0	0,59	0,20	0,03	1,2	32	4,02	26	30	43	F
2	Chinchiná-Pereira	5,0	6,6	0,45	9	8,8	1,9	0,41	0,26	0,03	1,2	28	3,80	20	28	51	F
3	Chinchiná-Chinchiná	4,8	7,3	0,48	117	21,6	0,6	0,25	0,15	0,09	1,6	25	2,69	36	33	31	FAr
4	Chinchiná-Venecia	4,7	10,2	0,62	8	13,7	0,5	0,21	0,18	0,01	2,8	40	3,70	22	33	45	F
5	Timbío	5,5	13,2	0,72	4	6,2	6,4	2,17	0,64	0,08	0,5	36	9,79	16	21	63	FA
6	Fresno	5,5	10,7	0,64	4	1,7	0,6	0,14	0,13	0,05	0,7	30	1,62	18	30	52	F
7	Quindío	5,3	3,5	0,26	45	0,7	2,3	0,38	0,23	0,02	0,8	17	3,73	18	15	67	FA
8	San Simón	5,4	2,6	0,20	43	5,0	3,9	1,39	0,19	0,09	0,2	12	5,77	36	15	49	ArA
9	Paujil	5,4	4,8	0,34	38	12,5	5,3	0,93	0,92	0,03	0,4	19	7,58	52	23	25	Ar
10	Doscientos-Jamundí	4,9	8,0	0,52	2	23,5	0,2	0,16	0,10	0,01	1,2	26	1,67	42	19	39	Ar
11	Doscientos-Sevilla	4,6	2,5	0,20	36	7,7	2,4	1,62	0,47	0,10	2,8	21	7,39	44	23	33	Ar
12	Suroeste	4,4	5,9	0,41	37	9,4	0,7	0,24	0,61	0,01	7,8	30	9,36	38	15	47	ArA
13	Salgar	4,7	7,7	0,50	128	1,9	2,9	0,67	0,62	0,02	2,0	22	6,21	24	17	59	FArA
14	Guadalupe	4,7	2,6	0,21	129	4,8	0,8	0,24	0,38	0,01	1,5	11	2,93	18	30	52	F

A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla

Tabla 3. Información sobre la mineralogía de las unidades de suelos utilizadas en el estudio.

No.	Unidad de suelo - Procedencia	Presencia del mineral
1	Libano	Albita 65%, Cordierita 17%, Sulfato oxotatanium 11%, Cristobalita 4%, Oxido silicato tricalcico 3%
2	Chinchiná-Pereira	Albita 76%, Cordierita 13%, Cuarzo 11%
3	Chinchiná-Chinchiná	Albita 86%, Hornblenda 13%, Cuarzo 1%
4	Chinchiná-Venecia	a-Si O2 (cuarzo) 61%, Hematina 30%, Natrita 5%, Dolomita 3%, Magnetita 1%
5	Timbío	Anortita 57%, Albita 26%, Indialita 8%, Cristobalita 7%, Óxido de sodio 2%
6	Fresno	Albita 55%, Cordierita 35%, Cuarzo 7%, Rutilo 2%, Zeolita 1%
7	Quindío	Albita 38%, Anfíbol 23%, a-Na2 17%, Aluminosilicato magnesico 11%, Cuarzo 10%
8	San Simón	Anortita 41%, Microclima 22%, Albita 21%, Hornblenda 9%, Cuarzo 6%, Cordierita 2%
9	Paujil	Cuarzo 42%, Microclima 24%, Caolinita 16%, Gipsita 9%, Metahallosita 8%
10	Doscientos-Jamundí	Gipsita 62%, Caolinita 37%, Versiculita 1%
11	Doscientos-Sevilla	Albita 70%, Cuarzo 14%, Potasio ciclo-trifosfato 10%, a-Na2 4%, Indialita 2%
12	Suroeste	Cuarzo 27%, Magnetita 25%, Oxide silicio 25%, Cristobalita 19%, Cuarzo 4%
13	Salgar	Cuarzo 76%, Caolinita 15%, Oxido de aluminio 6%, Magnetita 2%, Anatasa 1%
14	Guadalupe	Cuarzo 80%, Ortoclasa 13%, Cloritoide 6%, Cristobalita 1%

que el método empleado para valorar el aluminio intercambiable (extracción con KCl 1M) puede sobreestimar el contenido de este elemento en los Andisoles de la zona cafetera de Colombia, dado que no hay una relación entre los valores de la fase de cambio y los de la solución del suelo. Tampoco se ha encontrado relación alguna entre la acidez total y la MO (19).

El Mg²⁺ se incrementó conforme a los aumentos del Ca²⁺; sin embargo, no hubo una relación muy clara entre estos elementos y el K⁺ o el Na⁺ (Figura 1). El anterior comportamiento, además de sugerir una selectividad natural para el Ca²⁺, Mg²⁺ y Al³⁺ en todos los suelos estudiados, indica que en general la dinámica de estos elementos está gobernada por los mismos factores, no necesariamente así para K⁺ y Na⁺.

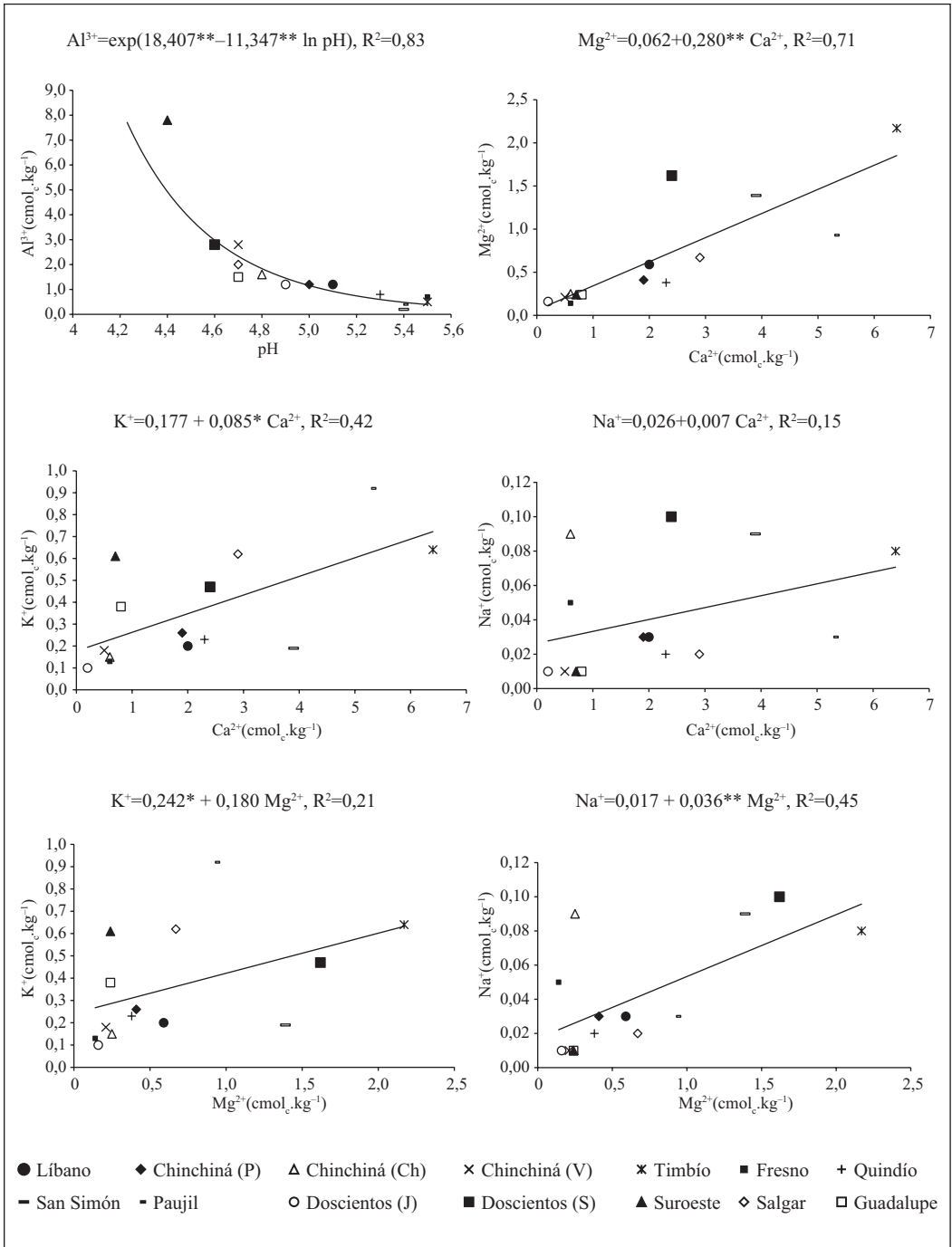


Figura 1. Relación entre pH y los cationes de cambio en las unidades de suelos evaluadas. * y ** indican que los parámetros son significativos a $p < 0,05$ y $p < 0,01$, respectivamente.

En el ámbito general, los valores más altos de la CIC, valorada por Acetato de amonio 1 M y pH=7,0, correspondieron a los suelos derivados de cenizas volcánicas, caracterizados por su alto porcentaje de CO y la presencia de alófana, y los valores más bajos a suelos cuyo origen era diferente a cenizas. La relación entre estas dos propiedades se presenta en la Figura 2, e indica una correlación estrecha de tipo lineal.

En los suelos ricos en CO, como los estudiados, hay una contribución significativa de los grupos carboxílicos a la CIC, la cual según Dahlgren *et al.* (8), representa en promedio 1 mol de carga negativa por cada 40 moles de CO. De acuerdo con la ecuación obtenida (Figura 2), por cada unidad porcentual de CO, la CIC se incrementa en 2,15 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$.

Cabe aclarar que los valores de CIC hallados no necesariamente representan las condiciones “naturales”, pues en suelos de carga variable, como los empleados en este trabajo, la metodología empleada para determinar esta propiedad (Acetato de amonio

1,0 M a pH=7,0), conduce a elevar los valores de esta propiedad, como consecuencia del aumento del pH. De acuerdo con Bohn *et al.* (4), la carga negativa del humus, y por ende su CIC, se debe a la disociación del H^+ de los grupos funcionales, que depende en su totalidad fuertemente del pH, los ácidos fúlvicos y húmicos se comportan como polielectrolitos ácidos débiles. Debido a lo anterior, en suelos de carga variable la CIC efectiva (CICE) es frecuentemente menor que la teóricamente posible (determinada con Acetato de amonio a pH=7,0) (24).

Una consecuencia de lo anterior se observa en la poca o nula relación que se halló entre CO y CICE, y entre CICE y CIC (Figura 3). Henao (14) tampoco encontró relación entre estas últimas dos variables cuando las analizó en suelos de la región cafetera. Essington (9) resalta que la CIC de un suelo a menudo se refiere a la máxima carga negativa potencial del coloide a pH 7,0. Posiblemente la falta de correlación entre estas variables tenga su origen en la diversidad de los suelos en este estudio, pues en una investigación desarrollada por Ciotta *et al.* (7), en un

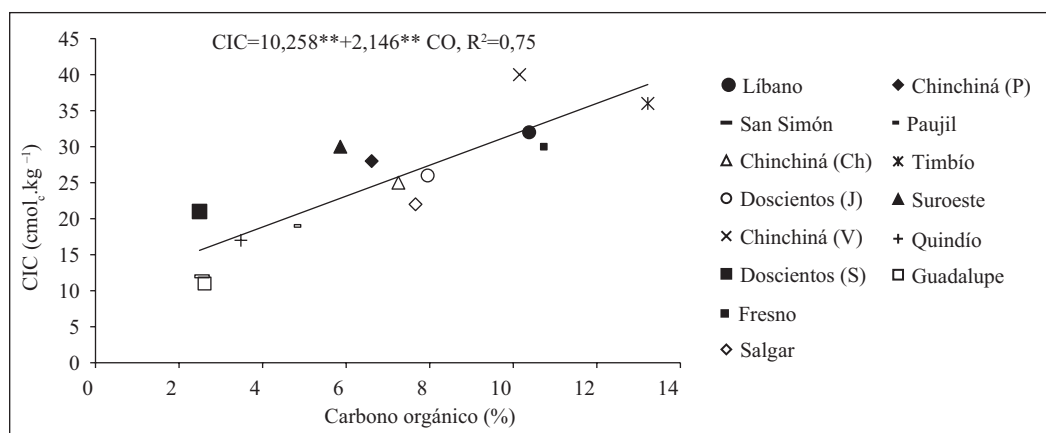


Figura 2. Variaciones de CIC con relación a los contenidos del carbono orgánico (CO) en los suelos evaluados. ** indica que los parámetros son significativos a $p < 0,01$.

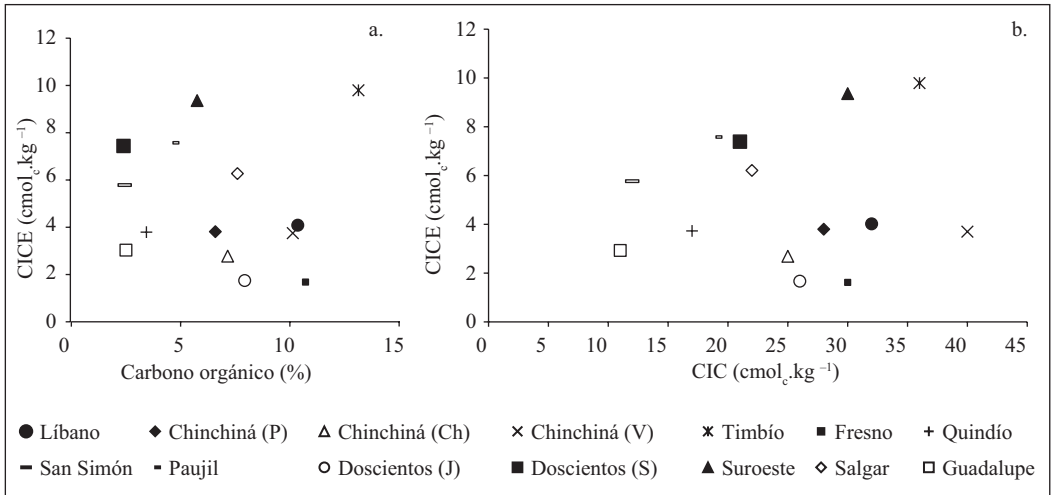


Figura 3. Cambios de CICE en función del carbono orgánico (a.) y CIC (b.)

Latosol de Brasil con diferentes sistemas de uso, se encontró relación directa tanto entre CO y CIC a pH=7,0 como entre CO y CICE, siendo cerca de tres veces mayores los valores obtenidos CIC frente a CICE.

El suelo proveniente de la unidad San Simón se caracterizó por las relaciones más amplias de Ca^{2+} y Mg^{2+} frente al K^{+} , comportamiento que tiene su origen tanto en el bajo contenido de K^{+} ($0,19 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$), como los relativamente altos niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} ($3,90$ y $1,39 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, respectivamente). En contraposición a lo anterior, la unidad Suroeste presentó las relaciones más estrechas entre Ca/K y Mg/K , como consecuencia de un elevado K^{+} intercambiable. La representación de la CICE con respecto a la CIC exhibió un rango amplio (entre 5,4 en la unidad Fresno y 48,1 en San Simón); sin embargo, los valores de esta variable fueron bajos para la mayoría de los suelos, de acuerdo con lo establecido por el Instituto Colombiano Agropecuario-ICA (15). En general, se puede afirmar que los suelos evaluados fueron disímiles en las relaciones objeto de estudio.

Además del pH y el contenido de CO, las propiedades que más han sido relacionadas con la capacidad para retener los cationes intercambiables son la textura y la mineralogía del suelo (11). En cuanto a la textura y el aporte de las arcillas a la capacidad de cambio, sólo se pudieron explicar las variaciones cuando los suelos se agruparon por su contenido de CO (Figura 4); en este sentido, para suelos con $\text{CO} < 5\%$ se presentó una alta correlación lineal entre el contenido de arcillas y la CICE. En contraposición a lo anterior, no se registró relación alguna entre arcillas y CIC, aun cuando se realizó la agrupación por CO (Figura 5). De acuerdo con la información suministrada por Batjes (3), existe una relación estrecha entre el contenido de las arcillas y la CIC, siempre y cuando los contenidos de la materia orgánica no excedan el 2%. Helling *et al.* (12) midieron la contribución de la materia orgánica y de la arcilla a la CIC en 60 suelos de Wisconsin (EUA), como respuesta a los cambios del pH (2,5; 3,5; 5,0; 6,0; 7,0 y 8,0). En este estudio, el promedio de la CIC de la materia orgánica para los anteriores valores del pH (36, 73, 127, 131,

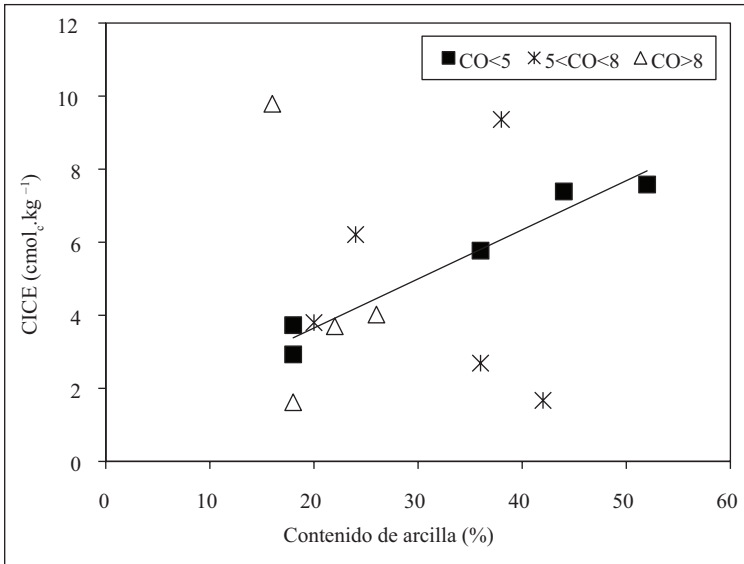


Figura 4. Relación entre el contenido de arcilla y la CICE ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} + \text{Al}^{3+}$) en los suelos evaluados. La línea continua corresponde al modelo de regresión para $\text{CO} < 5,0$ ($y = 0,962 + 0,135x$, $R^2 = 0,96$).

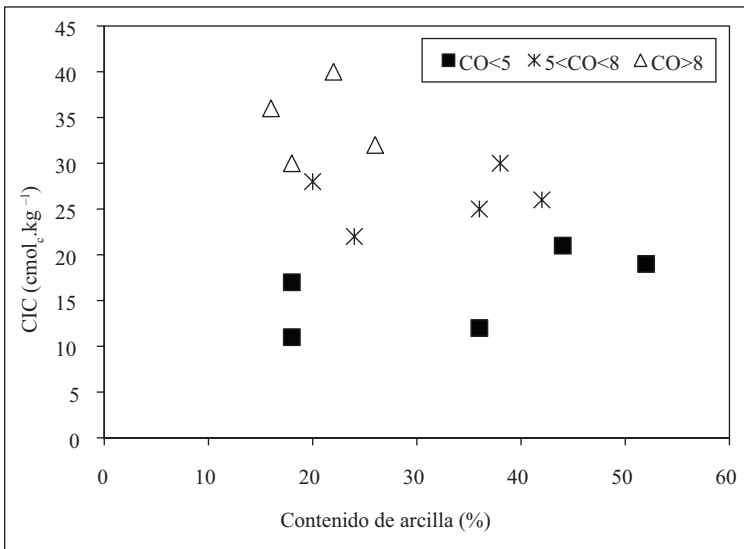


Figura 5. Relación entre el contenido de arcilla y la CIC en los suelos evaluados.

163 y 213 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, respectivamente), fue mayor que la de la arcilla (38, 46, 54, 56, 60 y 64 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, respectivamente).

En cuanto al material parental de los suelos o la composición de los minerales cristalinos se refiere, en general, no hubo

evidencias que pudieran relacionarlos de manera clara con el contenido de los cationes intercambiables. Como era de esperarse, en los suelos derivados de cenizas volcánicas la influencia de la mineralogía sobre los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} intercambiables fue poca, dado que el comportamiento de

éstos está gobernado básicamente por su predominancia en arcillas no cristalinas como la alófana y la imogolita, además de la influencia de otros factores de formación, principalmente la precipitación (8).

Los minerales cristalinos más frecuentes fueron cuarzo y albita; sin embargo, por ser éstos de carácter “cosmopolita” y no hacer aportes significativos de nutrientes, en principio no ejercen influencia directa en los elementos objeto de estudio. Se pudieron identificar algunas relaciones, entre ellas, la abundancia de anortita en las unidades Timbío y San Simón, y el alto contenido de Ca^{2+} intercambiable, pues de acuerdo con Havlin *et al.* (11), la anortita constituye una de las principales fuentes de este elemento. Minerales como anfíboles en la unidad Quindío han sido referenciados con una alta disponibilidad de K^+ (14), y se espera que de alguna manera la presencia de ortoclasa en la unidad Guadalupe y de microclima en San Simón y Paujil hayan contribuido en el aporte de K^+ , así mismo los contenidos de indialita en Timbío y cordierita en Líbano, Chinchiná–Pereira y Fresno hayan favorecido a los niveles de Mg^{2+} .

Los resultados presentados en esta investigación permiten concluir que:

- En los suelos evaluados se presenta el siguiente orden “natural” para retener las bases de cambio: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$.
- El aluminio intercambiable $-\text{Al}^{3+}$, disminuye con el incremento del pH, hasta alcanzar valores menores a $1,0 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ cuando el $\text{pH} > 5,1$.
- Existe una correlación positiva entre Ca^{2+} y Mg^{2+} , más no entre estos cationes y K^+ o Na^+ .
- Para los suelos objeto de estudio, caracterizados por ser de carga variable, la CIC determinada mediante acetato de amonio molar y neutro, presenta una alta dependencia con respecto al contenido del carbono orgánico–CO–, más no es una medida de la capacidad real del suelo para retener los cationes de cambio.
- En suelos con $\text{CO} < 5\%$, la fracción arcilla puede ser un buen indicador de la retención de los cationes intercambiables; sin embargo, no se halló relación alguna entre esta variable y la CIC.
- Sólo para algunas unidades de suelos se pudo establecer cierta relación entre la mineralogía de los suelos y los contenidos de los cationes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Ing. Agr., M.Sc. Hernán González O., Beatriz Mejía M.y Luz Adriana Lince S.

LITERATURA CITADA

1. BALLEONI, L.R.F.; MELLO, J.W.V. DE; ROCHA, W.S.D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. p. 69–129. En: VANDER DE F. M., L.R.; FERRACCIÚ, A. Química e mineralogia do solo. Vicosá : Sociedade brasileira de ciência do solo, 2009. Vol. 2.
2. BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach. New York : John Wiley and Sons, 1995. 414 p.
3. BATJES N., H. A homogenized soil data file for global environmental research: A subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1,0). Wageningen : ISRIC, 1995.
4. BOHN, H.L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G.A. Soil chemistry. 3a. ed. New York : John Wiley & Sons, 2001. 307 p.
5. BORTOLUZZI, E.C.; TESSIER, D.; RHEINHEIMER, D.S.; JULIEN, J.L. The cation exchange capacity

- of a sandy soil in southern Brazil: An estimation of permanent and pH-dependent charges. *European journal of soil science* 57:356-364. 2006.
6. CARRILLO, P. Manual de laboratorio de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 1985. 111 p.
 7. CIOTTA M., N.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions en solo con argila de actividade baixa sob plantio direto. *Ciencia rural* 33:1161-1164. 2003.
 8. DAHLGREN, R.; SHOJI, S.; NANZYO, M. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. p. 105-143. En: SHOJI, S.; NANZYO, M.; DAHLGREN, R. Volcanic ash soils genesis, properties and utilization. Amsterdam : Elsevier, 1993. 287 p.
 9. ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry; an integrative approach. Florida : CRC Press, 2003. 534 p.
 10. FAUZIAH, C.I.; JAMILAH, S.; OMAR, S.R. An evaluation of cation exchange capacity methods for acid tropical soils. *Pertanika journal of tropical agricultural science* 20(2/3):113-119. 1997.
 11. HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6a. ed. Nueva Jersey : Prentice Hall, 1999. 499 p.
 12. HELLING, C.S.; CHESTERS, G.; COREY, R.B. Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil science society of America journal* 28:517-520. 1964.
 13. HENAO T., M.C. Caracterización de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera central colombiana. p. 57-77. En: SUELOS del eje cafetero. Pereira : UTP : GTZ, 2001.
 14. HENAO T., M.C. Dynamique d'éléments fertilisants dans des sols dérivés de cendres volcaniques de la zone caféière centrale de Colombie, sous culture de bananier plantain. Louvain : Université Catholique de Louvain, 2002. 239 p.
 15. ICA. Fertilización en diversos cultivos, quinta aproximación: Manual de asistencia técnica. Bogotá : ICA, 1992. 64 p.
 16. LOYOLA, E.; PAVÁN M., A. Selectividade de troca de cátions em solos ácidos. *Revista brasileira de ciência do solo* 13:131-138. 1989.
 17. MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principios de nutrición vegetal. Basel : Internacional Potash Institute, 2000. 692 p.
 18. NELSON, L. Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. Ottawa : INPOFOS, 1999. 66 p.
 19. ORTIZ E., M.E.; ZAPATA H., R.D.; SADEGHIAN K., S. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1):51-57. 2006.
 20. ORTIZ E., M.E.; ZAPATA H., R.D.; SADEGHIAN K., S.; FRANCO A., H.F. Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé* 55(2):101-110. 2004.
 21. PATIÑO G., M.A.; SADEGHIAN K., S.; MONTOYA R., E.C. Caracterización de la fertilidad de los suelos de la zona cafetera del Valle del Cauca. Chinchiná : Cenicafé, 2007.
 22. SADEGHIAN K., S. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. *Cenicafé* 54(3):242-257. 2003.
 23. SADEGHIAN K., S. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Chinchiná : Cenicafé, 2008. 43 p. (Boletín Técnico No. 32).
 24. SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. p. 275-374. En: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. Viosa : Sociedade brasileira de ciência do solo, 2007.
 25. SPARKS, D.L. Environmental soil chemistry. San Diego : Academic Press, 2003. 352 p.
 26. ZAPATA H., R.D. Química de la acidez del suelo. Cali : Cargraphics, 2004. 208 p.
 27. ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMAN, J.; MIANO, T.; MILTNER, A.; SCHORTTH, G.; Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79(1197):117-161. 1997.