

ALUMINIO INTERCAMBIABLE EN SUELOS CON PROPIEDADES ÁNDICAS Y SU RELACIÓN CON LA TOXICIDAD

María Eugenia Ortíz-Escobar^{*}; Raúl Darío Zapata-Hernández^{**}; Siavosh Sadeghian Khalajabadi^{***}; Héctor Fernando Franco Alvarez^{****}

RESUMEN

ORTÍZ E. M.A.; ZAPATA H., R.D.; SADEGHIAN KH., S.; FRANCO A. H.F. Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relacion con la toxicidad. Cenicafé 55(2):101-110.2004.

Se estudió el comportamiento en los primeros 30cm de profundidad en 20 andisoles de la Zona Cafetera colombiana, ubicados en a los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca y Quindío y pertenecientes a las Unidades Chinchiná, Timbío, Piendamó y Montenegro, según la clasificación utilizada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Los suelos se seleccionaron por el alto contenido de Al intercambiable ($Al^{3+} > 1,5\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), y se utilizaron diferentes metodologías para evaluar su acidez: de Al intercambiable con 3 concentraciones del extractante (KCl), para evaluar el efecto de ésta en el contenido de Al; extracción de la solución del suelo por el método de la centrifuga y análisis de los lixiviados. Los resultados indicaron que el Al considerado como una de las principales fuentes de acidez en estos suelos es afectado por la concentración de KCl. La concentración de Al aumenta a medida que se incrementa la del extractante. La solución del suelo indica que las concentraciones de Al no se encuentran en niveles tóxicos y contrastan con los valores registrados por los métodos tradicionales ($Al^{3+} > 5 - 20\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), sin afectar la zona radical.

Palabras claves: Café, suelos, andisoles, cenizas volcánicas, zona cafetera, Colombia, aluminio.

ABSTRACT

Twenty volcanic ash-derived Andisol soils were studied by using the first 30 cm from A horizon. These soils of the Colombian coffee zone were located in departments of Antioquia, Caldas, Cauca and Quindío and they belong to the soil Units Chinchiná, Montenegro, Timbío and Piendamó according to the classification used by the National Federation of Coffee Growers of Colombia. The soils were selected by the high Al-KCl extractable content ($Al^{3+} > 1.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Different methodologies were used in order to determine their acidity: exchangeable Al determinations with different KCl concentrations to evaluate the effect of the extractant concentration in the Al content; soil solution extracted through the centrifuge method and the leachates analysis. The results indicated that Al considered as one of the main acidity source in these soils is affected by the KCl concentration. The Al concentration increases as the concentration of KCl extractant increases. The soil solution indicates that Al concentrations are not found in toxic levels and that they contrast with the values recorded by the traditional methods ($Al^{3+} > 5 - 20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) without affecting the root zone.

Keywords: Coffee, soils, andisols, volcanic ashes, Colombian coffee zone, aluminum

¹ Ph.D. University of Hawaii. E-mail: escobar@hawaii.edu

² Ph.D. Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

³ Asistente de Investigación. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

⁴ Analista químico. Multilab. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

Los suelos con propiedades ándicas se encuentran asociados comúnmente a las zonas volcánicas de todo el mundo en un amplio rango de climas, latitudes y altitudes. Para su formación se requiere suficiente lluvia y un buen drenaje para que ocurra una rápida meteorización del material parental, así como de la producción y acumulación de la materia orgánica (8). Los suelos formados bajo estas condiciones normalmente son ácidos (valores de pH entre 4,9 y 6,0) y tienen altos contenidos de aluminio intercambiable (Al^{+3}).

En la zona cafetera colombiana la mayoría de los suelos presenta propiedades ándicas, bien sea aquellos pertenecientes a los Andisoles alofánicos o no alofánicos. Los Andisoles alofánicos son menos ácidos y tienen menores contenidos de C. Orgánico ($pH > 5$ y C. Orgánico $< 6\%$), mientras que los no alofánicos son más ácidos y con mayores contenidos de C. orgánico ($pH < 5$ y C. orgánico $> 6\%$). Este último grupo se caracteriza por contener una fracción de arcilla dominada por minerales tipo 2:1 o hidroxil-Al interlaminado con minerales tipo 2:1. Las láminas de silicatos tipo 2:1 tienen iones de Al extraídos con KCl, los cuales contribuyen notoriamente a incrementar su acidez (11). Pese a lo anterior, el principal cultivo de la zona, el café, crece y se desarrolla sin ningún problema (por lo menos visible), po-

niendo en entredicho los resultados de laboratorio en lo referente a los contenidos de Al intercambiable.

En las recomendaciones de las dosis de cal necesarias para corregir los problemas de acidez se tienen en cuenta el pH del suelo y los valores de Al intercambiable extraído con KCl 1M. Kenneth *et al.*, (7), sugieren multiplicar el valor de Al intercambiable por un factor que oscila entre 1,5 y 2,0, para determinar la cantidad de cal requerida. Según estudios realizados por Valencia (13), en la zona cafetera colombiana se sugiere aplicar entre 1,5 a 2,0t/ha de cal en suelos con $pH < 5,5$ y contenidos de Ca $< 4,0me/100g$ de suelo; en este mismo sentido, Espinosa (4), registra aplicaciones hasta de 6t/ha de cal para precipitar el Al en Andisoles con alta capacidad tampón en algunos suelos de Ecuador. En Sur Africa se requiere una aplicación anual de cerca de 4,5t/ha de cal (9) y en Brasil (2), se sugieren dosis de 2,5t/ha para el mismo fin, repercutiendo en todos los casos notoriamente en los costos de producción, sin obtener un beneficio económico y alterando las condiciones químicas del suelo. Según los resultados obtenidos en laboratorio, podría esperarse que el buen desarrollo de los cultivos estuviera comprometido como consecuencia de los altos contenidos de Al intercambiable. En la Tabla 1 pueden observarse

Tabla 1. Valores de Al intercambiable (KCl, 1M) en algunos suelos de la zona cafetera colombiana.

Localidad*	pH	M.O. (%)	Al ($cmol_c\ kg^{-1}$)	Localidad *	pH	M.O. (%)	Al ($cmol_c\ kg^{-1}$)
Caldas – Chinchiná	4,8	9,2	1,5	Antioquia – Venecia	4,7	17,9	3,3
E.C. Naranjal	4,7	14,5	1,6	Antioquia – Venecia	4,5	15,4	3,7
Cauca – El Tambo	4,8	19,4	1,6	Caldas – Manizales	4,5	3,4	4,1
Caldas – Chinchiná	4,1	4,4	1,8	Antioquia – Venecia	4,4	17,5	5,1
Caldas – Chinchiná	4,6	9,3	2,0	Risaralda – S.R. Cabal	4,6	8,6	6,5
Caldas – Chinchiná	4,1	5,2	2,5	S.E. El Rosario	4,1	12,8	9,5
S.E. El Rosario	4,6	16,1	2,5	S.E. El Rosario	4,1	9,9	12,9
Cauca – El Tambo	4,3	22,0	2,6	S.E. El Rosario	4,2	7,1	16,5

* E.C. Estación Central, S.E. Subestación.

Fuente: Laboratorio de Suelos, Cenicafé, registros de 1997 - 2000

algunos valores de pH, contenido de materia orgánica y de Al intercambiable pertenecientes a muestras de suelos ubicadas en diferentes regiones del país, evidenciando el “problema” de altos niveles de Al en la región cafetera colombiana.

Con el presente estudio se buscó evaluar la metodología actual para la determinación de Al intercambiable en suelos derivados de ceniza volcánica y reunir un mayor criterio para valorar su toxicidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los meses de noviembre y diciembre de 2001 se tomaron muestras de suelos en

veinte sitios formados a partir de materiales volcánicos y pertenecientes a las siguientes unidades cartográficas de suelos, de acuerdo a la nomenclatura utilizada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia: Chinchiná (CH), Timbío (TI), Piendamó (PI) y Montenegro (MN), en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca y Quindío (Tabla 2). El muestreo se realizó en los primeros 30cm del horizonte A de cada perfil.

Los suelos se seleccionaron considerando los valores de Al intercambiable ($>1,5\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$), de acuerdo con la información de los resultados de análisis de suelo de los años 1997 al 2000 del Laboratorio de Suelos de Cenicafé. Se evaluaron las siguientes características químicas empleando las metodologías descritas por

Tabla 2. Ubicación y clasificación taxonómica de los suelos del estudio

Muestra	Departamento	Municipio	Sitio*	Unidad de Suelo	Clasificación taxonómica
1	Caldas	Palestina	La Plata	CH	Thaptic Fulvudands
2	Caldas	Chinchiná	La Quebra	CH	Typic Melanudands
3	Antioquia	Jericó	Finca La Casandra	CH	Pachic Melanudands
4	Antioquia	Andes	El Bosque	CH	Acrudoxic Fulvudands
5	Antioquia	Jardín	Quebrada Bonita	CH	Acrudoxic Fulvudands
6	Antioquia	Jardín	La Casiana	CH	Typic Melanudands
7	Antioquia	Concordia	Llanadas	CH	Pachic Fulvudands
8	Antioquia	Venecia	S.E. El Rosario	CH	Pachic Melanudands
9	Cauca	Tambo	Las Piedras	TI	Acrudoxic Melanudands
10	Cauca	Popayán	Figuroa	TI	Acrudoxic Fulvudands
11	Cauca	Timbío	San Pedro	TI	Pachic Melanudands
12	Cauca	Tambo	S.E. El Tambo	TI	Pachic Melanudands
13	Cauca	Piendamó	Octavio	PI	Typic Melanudands
14	Cauca	Piendamó	San José	PI	Acrudoxic Fulvudands
15	Cauca	Piendamó	San Isidro	PI	Acrudoxic Fulvudands
16	Cauca	Morales	Santa Rosa	PI	Alic Hapludands
17	Quindío	Montenegro	Pueblo Tapao	MN	Spodic Dystrudepts
18	Quindío	Montenegro	El Gigante	MN	Humic Dystrudepts
19	Quindío	Montenegro	La Julia	MN	Spodic Dystrudepts
20	Quindío	Circasia	La Julia	MN	Acrudoxic Fulvudands

* Vereda, Finca, o Subestación de Cenicafé (S.E.)

Descripción y clasificación: María Eugenia Ortiz-Escobar, Oscar J. Alvarez y Henry Quevedo.

Franco (5) y propiedades ándicas propuestas por Campos *et al.*, (1), ambos para fines de clasificación taxonómica: pH (relación suelo:agua 1:1, potenciométrico), materia orgánica (Walkey y Black), P (Bray II, colorimétrico), Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} (Acetato de amonio 1N, neutro, absorción atómica), Al^{3+} (KCl 1N, absorción atómica), Fe, Mn, Zn y Cu (acetato de amonio y EDTA, absorción atómica), densidad aparente, retención de fosfatos, Al, Fe y Si Oxalato de amonio, Al y Fe Pirofosfato de sodio, índice melánico, y retención de humedad.

Para lograr el objetivo propuesto se realizaron, por triplicado, diferentes determinaciones analíticas para cada muestra de suelo. Se utilizó el valor promedio obtenido para el análisis de estadística descriptiva.

Las determinaciones consistieron en:

Valoración del Al intercambiable en el suelo.

Se analizó el efecto de la concentración del extractante (KCl) sobre el Al intercambiable. Se utilizó la metodología descrita por Franco (5), empleando tres concentraciones; una que se recomienda en el método citado (1,0 M), y otras dos más diluidas (0,1 y 0,01M).

Evaluación del Al en la solución del suelo. Se realizó siguiendo la metodología registrada por Elkhatib *et al.*, (3), la cual consiste en extraer la solución del suelo por centrifugación cuando está a una humedad de 33KPa. Se realizan determinaciones de pH, CE, aniones y cationes.

Determinación del Al en los lixiviados. Se empacaron aproximadamente 250g de suelo con un contenido de humedad de 33KPa en columnas de PVC, de 60cm de largo y con un diámetro de 5cm. En la base de cada columna se instaló una malla para evitar la pérdida de

suelo y permitir la salida del efluente (10). Se adicionaron volúmenes de una solución de H_2SO_4 0,001M (el volumen adicionado a cada muestra fue igual al volumen de poros de esa muestra). Se colectaron los lixiviados a los cuales se les determinó el contenido de cationes (por absorción atómica Perkin Elmer 2380), pH y CE; hasta observar que no hubo más variación en las determinaciones. En total, se hicieron 6 aplicaciones de la solución. El anterior proceso es conocido como desplazamiento miscible haciendo referencia al movimiento de uno o más fluidos completamente solubles en un medio poroso y considerando que el mayor mecanismo de acidificación del suelo es el lavado de bases, y en las aguas de drenaje el transporte de acidez solamente puede ser afectado por la presencia de aniones inorgánicos tales como cloruros, nitratos y sulfatos, o por aniones orgánicos de un bajo pK^1 .

RESULTADOS Y DISCUSION

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados de análisis químicos y propiedades ándicas, respectivamente.

Se registró una amplia variación de los parámetros utilizados en el estudio, la cual, además de indicar su efecto diferencial de los factores formadores revela la variabilidad espacial de los suelos, influenciada posiblemente por los sistemas de uso y manejo. El contenido de materia orgánica y de Al es muy variado dentro de todas las muestras y aún dentro de cada Unidad. El parámetro más uniforme es el pH y las demás características no presentan diferencia entre las muestras.

Los valores de las propiedades ándicas (requisito para ser clasificados dentro del orden Andisol), según Shoji *et al.* (11) son: $\text{Da} < 0,9$

¹ZAPATA, H.R. La química de la acidez del suelo. Comunicación personal. 2002.

Tabla 3. Datos de caracterización química de los suelos de estudio.

Muestra	Unidad de Suelo	pH Agua 1:1	M.O. (%)	P (ppm)	K	Ca	Mg	Al (cmol _c kg ⁻¹)	Fe	Mn	Zn	Cu
1	CH	5,1	11,0	3	0,19	1,6	0,6	0,6	189	14	4	5
2	CH	5,6	10,4	1	0,05	0,9	0,1	0,2	203	15	4	2
3	CH	5,5	20,9	1	0,28	1,2	0,8	0,8	232	21	3	10
4	CH	5,2	16,2	1	0,10	0,1	0,1	1,2	156	37	4	4
5	CH	5,6	22,6	0	0,07	0,7	0,1	0,6	176	29	8	2
6	CH	4,9	24,8	1	0,11	0,2	0,1	3,3	139	13	2	3
7	CH	5,1	18,4	1	0,06	0,0	0,1	2,3	211	14	6	4
8	CH	4,5	24,0	8	0,17	0,3	0,1	3,5	322	11	2	8
9	TI	5,5	21,2	1	0,09	0,1	0,1	0,9	166	7	3	2
10	TI	4,9	16,9	1	0,14	0,1	0,1	1,2	124	14	6	3
11	TI	5,3	18,0	1	0,31	0,8	0,6	1,0	212	21	3	3
12	TI	5,3	18,3	2	0,14	1,7	0,6	1,0	165	19	4	4
13	PI	5,2	22,5	2	0,35	2,6	1,6	0,2	177	5	3	3
14	PI	5,6	18,2	1	0,11	0,2	0,1	0,4	144	1	2	3
15	PI	5,1	19,7	1	0,26	0,6	0,3	1,1	94	11	2	10
16	PI	5,3	29,9	3	0,12	0,2	0,1	2,8	152	13	21	2
17	MN	5,2	6,2	20	0,13	2,9	0,2	0,6	246	5	3	4
18	MN	5,3	4,1	9	0,87	4,6	1,0	0,1	430	36	8	27
19	MN	5,1	4,4	7	0,05	0,6	0,1	1,1	150	10	2	1
20	MN	5,3	9,4	1	0,12	0,2	0,1	0,7	103	11	2	1

Tabla 4. Propiedades ándicas y fracción mineral de los suelos de estudio calculados teóricamente.

Muestra	Unidad de Suelo	Da(Mg m ⁻³)	Ret P(%)	Alo+1/2Feo(%)	Al/Si	Alp/Alo
1	CH	0,85	92,96	2,98	2,47	0,39
2	CH	0,80	95,78	2,92	2,32	0,38
3	CH	0,70	98,59	4,52	1,45	0,46
4	CH	0,59	99,06	4,82	1,82	0,41
5	CH	0,64	98,12	5,31	1,74	0,38
6	CH	0,51	99,06	4,83	1,42	0,53
7	CH	0,51	97,47	2,90	1,92	1,00
8	CH	0,57	98,41	4,94	1,64	0,54
9	TI	0,50	99,06	5,65	3,43	0,32
10	TI	0,58	98,59	5,36	2,01	0,25
11	TI	0,59	99,06	6,23	2,57	0,23
12	TI	0,78	98,59	4,92	1,71	0,32
13	PI	0,42	99,06	6,18	1,94	0,33
14	PI	0,62	99,06	5,46	2,41	0,33
15	PI	0,57	99,06	5,42	1,63	0,45
16	PI	0,53	98,59	4,60	2,10	0,91
17	MN	1,20	55,91	0,93	5,29	0,90
18	MN	1,27	41,84	0,81	4,45	1,60
19	MN	1,14	67,17	1,29	4,32	0,51
20	MN	0,90	91,09	2,30	2,62	0,47

Ret P: Retención de fosfatos

Mg m⁻³, retención de fosfatos >85% y $Al_2O_3/FeO > 2\%$. De acuerdo con los resultados, las muestras 17, 18 y 19 fueron clasificados dentro del orden Inceptisol, por no cumplir con los requisitos de propiedades ándicas. Con base en la relación Al_2O_3/Al_2O_3 se realiza la clasificación de los Andisoles en alofónicos (<0,5) y no alofónicos (>0,5), encontrándose trece muestras alofánicas en total. La relación Al_2O_3/SiO_2 , se utiliza para determinar (teóricamente) si la alófana presente en los suelos es rica en Al o Si. Cuando la relación es cercana a uno, es el Al el que domina; si esta cercana a 2 será el Si, favoreciendo la formación de Imogolita.

Aluminio intercambiable en el suelo. Con relación a la determinación de Al con diferentes concentraciones de KCl en los suelos en estudio, se encontró que éste aumentaba conforme al incremento de la concentración del extractante (Tabla 5).

Puede notarse que los suelos correspondientes a la Unidad Chinchiná presentaron los mayores contenidos de Al intercambiable en todas las concentraciones de KCl, aumentando a medida que se incrementaba la concentración de extractante aunque según la prueba de Duncan al 5% de probabilidad, todos los suelos fueron iguales en promedio.

La variación en el contenido de Al en los suelos no concuerda con la uniformidad que estos deberían tener al ser clasificados dentro de unidades de suelo (aunque es posible que los criterios para definir las unidades no consideren el contenido de Al intercambiable u otros elementos), como ocurre con las marcadas diferencias en las características químicas y propiedades ándicas de las muestras del estudio (Tablas 3 y 4).

A medida que se incrementó la concentración del extractante (KCl), disminuyó la variabilidad en el contenido de Al en los suelos de la Unidad PI, resultando la unidad de suelo

con mayor contenido de materia orgánica en promedio (22,6%). Los suelos de la Unidad MN, fueron los únicos que presentaron menor variabilidad con la concentración más baja, siendo los que tienen en promedio los contenidos más bajos de materia orgánica; las muestras de suelo de la Unidad CH presentaron los promedios más altos de Al en todas las concentraciones; y los suelos de la Unidad TI, que presentaron la menor variabilidad en el contenido de Al, tienen altos contenidos de materia orgánica en promedio, y fueron los únicos que tuvieron todas las muestras con dominio de alófana; las otras unidades presentaron muestras alofánicas y no alofánicas. Todas estas diferencias pueden indicar que esa variabilidad puede deberse al manejo que se le hace a los suelos, y que no está influyendo el contenido de materia orgánica ni la mineralogía; además, se confirma que el KCl como solución extractora no es selectiva en la determinación del Al intercambiable, como se puede notar la alta variabilidad en las unidades de suelos en la Tabla 5; tampoco son consistentes los incrementos en las concentraciones de Al intercambiable con los de la concentración del KCl para todas las muestras.

Gartner (6) señala que la utilización del KCl 1M para evaluar la toxicidad del Al^{+3} es adecuada sobre todo cuando se trabaja en suelos de carga constante y cuando se utiliza en suelos con coloides de carga variable y extrae además otras formas de Al provenientes de hidróxidos de Al precipitados y de Al quelatado con la materia orgánica que no son tóxicas. En el caso de Andisoles de Colombia (suelos de carga variable), este método llega a reportar valores que superan los 20cmol/kg de suelo, los cuales sólo permitirían el desarrollo de cultivos muy tolerantes a este catión. Wada (14), afirma que la adición de KCl induce la hidrólisis del Al liberado de las láminas de los silicatos en presencia de materiales de carga variable, pero que no hay extracción

de este catión cuando se utiliza la misma solución en Andisoles ricos en alófana e imogolita, que desarrollan superficies de carga positiva por la adsorción de H⁺, a pesar que la mayoría de los suelos Ando así como los suelos ácidos del trópico húmedo, tienen cantidades significativas de materiales de carga variable.

Aluminio en la solución del suelo. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que los suelos no contenían fosfatos en la solu-

ción o no fueron detectados debido posiblemente a bajas concentraciones; esto puede explicarse debido a la alta retención de fosfatos que caracteriza a los suelos con propiedades ándicas, de ahí que no se presenten resultados de esta variable. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la composición química de la solución del suelo de las muestras de estudio.

Las bajas concentraciones de Al en la solución no concuerdan con el Al determinado

Tabla 5. Promedios y variación del Al (cmol kg⁻¹) en las muestras de las cuatro Unidades de Suelo estudiadas, utilizando diferentes concentraciones de KCl.

Concentración de KCl	Unidad de suelo							
	Chinchiná(CH)		Montenegro(CH)		Piendamó(CH)		Timbío(CH)	
	Promedio*	CV(%)	Promedio*	CV(%)	Promedio*	CV(%)	Promedio*	CV(%)
0,01M	0,09	101,4	0,05	31,4	0,04	70,8	0,03	115,9
0,1 M	0,33	77,5	0,12	10,3	0,07	52,3	0,16	70,8
1 M	1,61	79,4	0,60	75,9	0,75	10,9	1,22	18,1

* Corresponden a los promedios de las muestras de suelo de cada Unidad, las cuales a su vez, son el promedio de tres replicaciones en laboratorio.

Tabla 6. Composición química de la solución del suelo para las muestras de estudio.

Unidad de suelo	pH	CE (uS/cm)	Al ³⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ ppm	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ²⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
CH	5,6	416	0,48	2,07	3,44	16,42	5,77	15,78	7,79	0	119,75	5,43
CH	5,6	202	0,14	3,20	6,65	6,88	2,03	14,45	6,19	0	101,55	0,76
CH	6,4	68,7	0,28	1,21	6,75	4,03	0,26	0,26	5,44	0	8,66	2,32
CH	4,9	129,7	0,31	7,16	7,14	4,85	1,29	0,81	6,18	0	54,15	0
CH	5,6	68,4	0,63	1,45	6,05	3,09	0,11	2,53	1,48	0	25,28	0,48
CH	4,3	164,9	1,10	3,11	2,65	6,00	1,97	9,54	5,33	0	76,36	0
CH	6,0	83,1	0,08	1,77	8,45	5,90	0,21	0,42	4,17	0	14,37	0,47
CH	4,6	217	0,71	1,51	4,06	10,99	3,42	12,31	6,87	0	90,00	0,35
TI	5,6	50,5	0	1,18	2,68	6,11	0,24	0,28	10,86	0	0,07	1,27
TI	4,6	104,8	0,48	1,49	3,56	8,72	1,39	3,38	1,18	0,45	38,35	0
TI	5,2	458	0,22	3,91	2,08	34,95	16,38	26,99	17,36	4,02	0	1,32
TI	5,5	237	0	2,60	8,88	6,42	6,56	20,21	6,81	0	105,53	1,74
PI	5,1	251	0	1,40	2,42	12,75	10,13	13,08	6,00	0	108,38	0
PI	5,9	28,1	0	1,22	1,66	1,84	0,20	0,49	1,99	0	0,11	2,73
PI	5,6	266	0,03	0,78	3,09	17,55	6,64	19,67	2,82	0	119,63	0
PI	6,0	83,8	0,14	2,20	5,79	3,86	0,16	0,20	5,46	0	0,63	10,41
MN	6,0	566	0,20	1,63	3,99	89,01	3,59	30,43	0	0	0	9,17
MN	5,8	143,6	0,28	2,10	3,78	5,08	3,76	16,66	2,97	0	78,62	0
MN	5,8	83,4	0	2,34	3,22	4,49	0,82	7,13	3,89	0	29,56	0
MN	5,6	176,1	0	2,82	5,08	13,28	2,14	3,06	2,13	0	71,24	0

pH: Agua (1:1); Al³⁺: Colorimetría; aniones y cationes por HPLC. Los valores de cero no fueron detectados.

como intercambiable, y la variación dentro de cada unidad de suelo puede atribuirse a un posible manejo de suelos (prácticas de fertilización) que pudieron estar enfocados a suplir los requisitos de Ca y Mg de acuerdo a los resultados obtenidos. Al comparar los valores de pH de la solución del suelo con el pH del extracto de suelo se encuentra que no presentaron ninguna diferencia, lo que hace pensar que las diferencias en las variables antes mencionadas están más relacionadas con prácticas de fertilización que con prácticas de corrección de acidez. Con la ayuda del programa SOILSLN (15), se calculó la actividad del Al en la solución del suelo y las formas en las cuales se encuentra en estas muestras, los resultados que se presentan en la Tabla 7.

Es importante notar que es muy poca la concentración del Al que se encuentra en esta fase, siendo quizás la respuesta más importante de esta la investigación al permitir considerar con base en éstos resultados que es esa la razón por la cual las plantas de café crecen y se desarrollan tan bien en estos suelos, y que el Al reportado como intercambiable no se relaciona con la actividad de éste en la solución del suelo. Sposito (12) coincide con varios autores al afirmar que la toxicidad del Al puede ser el principal problema en suelos ácidos con valores de pH inferiores a 5,5, en suelos de zona templada y del trópico; pero plantea que en algunos suelos ácidos ricos en materia orgánica nativa o enmiendas con grandes cantidades de residuos orgánicos, generalmente

tienen bajas concentraciones de Al en la solución del suelo que le permite un buen crecimiento de los cultivos bajo condiciones “tóxicas” debido a la formación de complejos con la materia orgánica. Según los resultados encontrados hasta ahora, se puede afirmar que existe una fuente orgánica o posiblemente inorgánica insoluble que está reteniendo el Al, formando complejos los cuales no son tóxicos y permitiendo el desarrollo radical de las plantas.

Aluminio en los lixiviados. El análisis de los lixiviados mostró que el pH aumentó consecutivamente hasta alcanzar un equilibrio; la conductividad eléctrica disminuye poco a través de las aplicaciones de ácido sulfúrico pero alcanza finalmente un equilibrio; el Al desciende hasta alcanzar uniformidad. El Ca al igual que el Al, disminuye hasta alcanzar valores constantes (muestra 3, Unidad Chinchiná). Cuando se hace referencia al equilibrio significa que los valores se hacen constantes con las diferentes aplicaciones de ácido, siendo éstas cada vez mayores (Figura 1). También se utilizó el programa SOILSLN para analizar la información y se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 8, resultando ser básicamente un estudio de la especiación del Al.

En la Tabla 8, se observan las diferentes formas en las que se encuentra el Al en los lixiviados y su concentración, hallándose muy bajas como para ser responsables de la acidez,

Tabla 7. Especiación del Al en la solución del suelo para las muestras de estudio

Unidad de suelo	Al ³⁺	AlOH	Al(OH) ₂ , Al(OH) ₃ , Al(OH) ₄ , Al-SO ₄			
			(molL ⁻¹)			
CH	10E-6,8	10E-6,6	10E-5,04	10E-6,3	10E-9,07	10E-8,8
TI	10E-6,8	10E-6,7	10E-5,25	10E-6,6	10E-9,5	10E-8,4
PI	10E-8,34	10E-7,8	10E-5,9	10E-6,76	10E-9,21	10E-9,85
MN	10E-8,16	10E-7,47	10E-5,43	10E-6,16	10E-8,46	10E-9,51

al igual que en análisis que se realizó de la solución del suelo.

En este estudio de lixiviación de fuente de acidez con ácido sulfúrico diluido se muestra

cómo la capacidad neutralizante de acidez (CNA) del suelo es disminuida y como consecuencia hay una continua pérdida de bases. La CNA aunque disminuye, no llega en este experimento a liberar Al tóxico a los lixiviados.

Figura 1.
Variación de algunos parámetros determinados en los lixiviados (relación del volumen total adicionado (Vi) sobre el volumen inicial (Vo) de ácido) en la muestra Jericó (3), Unidad Chinchiná.

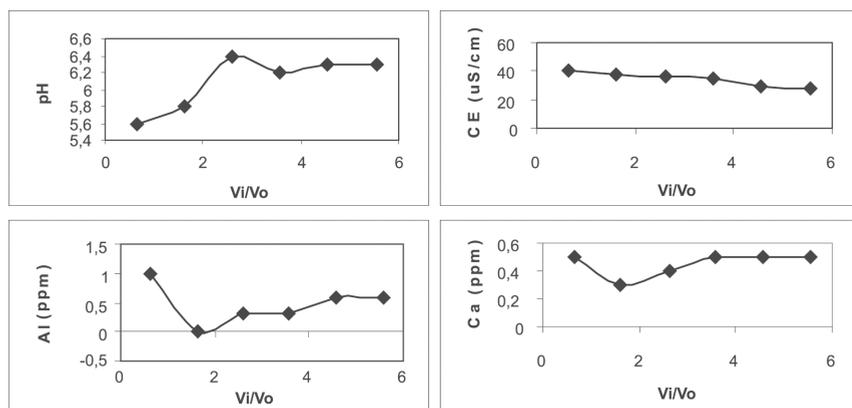


Tabla 8. Especiación del Al en los lixiviados de las Unidades de suelo.

Unidad de suelo	Al ³⁺	AlOH	Al(OH) ₂	Al(OH) ₃	Al(OH) ₄
	(molL ⁻¹)				
CH	10E-8,5	10E-7,9	10E-6,05	10E-6,9	10E-9,5
TI	10E-7,5	10E-6,9	10E-5,05	10E-5,9	10E-8,5
PI	10E-8,1	10E-7,3	10E-5,1	10E-5,7	10E-7,9
MN	10E-7,4	10E-6,7	10E-4,6	10E-5,3	10E-7,6

LITERATURA CITADA

- CAMPOS, A.C.; OLESCHKO, K.; CRUZ, L.H.; ETCHEVERS, J.D.; HIDALGO, C.M. Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán de Perote. *Terra* 19 (2): 105 – 116. 2001.
- CHAVES C., D.J.; PAVAN, M.A.; IGNE, K. Respostas do cafeiro a calagem. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 19 (5): 753. 1984.
- ELKHATIB, E.A.; HERN, J.L.; STALEY, T.E. A rapid centrifugation method for obtaining soils solution. *Soil Science Society of America Journal* 51 (3): 578-583. 1987.
- ESPINOSA, J. Acidez y enclado de los suelos. *In: SILVA M., F. Ed. Fertilidad de suelos; diagnóstico y control.* Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo – SCCS, 1994. p. 113-129.
- FRANCO A., H. F. Métodos químicos de análisis de suelos. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ – CENICAFE. CHINCHINA. COLOMBIA. Informe anual de labores de Química Agrícola 1997-1998.* Chinchiná, Cenicafé, 1998.

6. GARTNER, C. Determinación del aluminio tóxico en dos suelos ácidos. Medellín, Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 1994. 55 p. (Tesis: Químico).
7. KENNETH, M.; OATES M.; KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming. II. Evaluation of using aluminum extracted by various chloride salts for determining lime requirements. Soil Science Society of America Journal 47: 690 –692. 1983.
8. MALAGÓN, D.; PULIDO, C.; LLINAS, R. Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos. Suelos Ecuatoriales 22 (1): 50 – 68. 1992.
9. MOLOKOBATE, M.S. An evaluation of the use of organic amendments to ameliorate aluminum toxicity and phosphorus deficiency in an acid soil. Pietermaritzburg, University of Natal, 2001. 265p. (Tesis: Mestría)
10. NIELSEN, D.R.; J.W. BIGGAR. Miscible displacement in soils. I. Experimental information. Soil Science Society of America Proceedings 25 (1): 1 – 5. 1961.
11. SHOJI, S.; NANZYU, M. ; DAHLGREN, R. Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1993. 288 p.
12. SPOSITO, G. The environmental chemistry of aluminum. 2. ed. Boca Raton, FL. Lewis Publishers. 1996. 464 p.
13. VALENCIA A., G. Encalado del suelo en cafetales. Avances Técnicos Cenicafé No. 140: 1-4. 1988.
14. WADA, S.I.A critical evaluation of 1 M KCl-extraction method for determining exchangeable Al ions in variable charge soils. Soil Science and Plant Nutrition 33 (2): 153 – 160. 1987.
15. WOLT, J.D. Soil Soln. A program for teaching equilibria modeling of soil solution composition. J. Agron. Ed. 18: 40 – 42. 1989.