

# Determinación de acidez en andisoles de la zona cafetera colombiana utilizando diferentes metodologías

M. E. Ortiz E.<sup>1</sup> y R. Zapata H.<sup>2</sup>

## COMPENDIO

En el estudio se utilizaron los primeros 30 cm del horizonte A de veinte perfiles con características ándicas, seleccionados por el alto contenido de Al intercambiable extraído con KCl 1N ( $Al^{3+} > 1.5 \text{ cmol/kg suelo}$ ), situados en los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío y Cauca y pertenecientes a cuatro unidades (Chinchiná, Montenegro, Timbío y Piendamó), en la clasificación de la Federación de Cafeteros. Se utilizaron diferentes metodologías para comprobar el efecto de la concentración del extractante sobre el contenido de Al. Se emplearon titulaciones potenciométricas y conductométricas para determinar posibles fuentes inorgánicas de acidez. También se analizaron la fracción orgánica del suelo (acidez total de los ácidos húmicos), la capacidad complejante de la materia orgánica, la solución del suelo y los lixiviados. La concentración de Al aumentó a medida que se incrementó la concentración de KCl como extractante. Las especies hidroxy - Al no fueron detectadas por los métodos de titulación, debido a los altos contenidos de materia orgánica. Los complejos Al-MO tuvieron valores cercanos a cero en las dos soluciones (agua y KCl) y el Al libre (métodos Lindsay y SOILSLN) provino probablemente de fuentes inorgánicas no tóxicas para las plantas. La solución del suelo indicó que el Al no se encontró en niveles tóxicos contrastando con los valores registrados por los métodos tradicionales y que en altos contenidos (hasta 20 cmol/kg suelo) puede desarrollarse el sistema radical de las plantas.

**Palabras claves:** Al intercambiable, titulaciones potenciométrica y conductométrica, toxicidad de Al.

## ABSTRACT

The soils of the study are volcanic ash- derived Andisols and were used the first 30 cm from the A horizon of twenty different soils of the Colombian coffee zone, selected by the high Al-KCl extractable content ( $Al^{3+} > 1.5 \text{ cmol/kg of soil}$ ), in Antioquia, Caldas, Quindío and Cauca Colombian states, classified as Chinchina, Montenegro, Timbío and Piendamo Units of soils, classification used by the Colombian Coffee Federation. Different methodologies were used, Al determinations with different KCl concentrations to evaluate the effect of the extractant concentration in the Al content. Potentiometric and conductometric titrations were used to determine possible inorganic sources of acidity. The soil organic fractions (total acidity of the humic acids), the organic matter complexes, soil solution and the leachates were also analyzed. The results indicate that Al consider as one of the main acidity source in these soils, is affected by the KCl concentration. The Al concentration increased as the concentration of KCl extractant increased. Hydroxy Al species were not detected by the titration methods; Al - organic matter complexes were negligible in both solutions (water and KCl 1N), and the free Al determined by the two methods (Lindsay and SOILSLN) probably is from an inorganic source, which is not toxic for the plants. Soil solution indicates that Al concentrations were not present in toxic levels, and contrast with the values reported by traditional methods ( $Al^{3+} > 20 \text{ cmol/kg of soil}$ ) without any damage in the root zone.

**Key words:** Al-exchangeable, Potentiometric and conductometric titrations, Al toxicity.

## INTRODUCCIÓN

Los Andisoles, aunque no siempre se desarrollan a partir de piroclastos (ceniza volcánica, tufitas, pómex, cinders, lahar), ocupan el 11.6% del territorio agrícola de Colombia (Malagón, Pulido y Llinas, 1992). De los tres millones de hectáreas de la zona

cafetera colombiana existen 870.000 hectáreas en cafetales, el 52% de los cuales están en suelos derivados de ceniza volcánica, altamente fijadores de fósforo, con pH inferior a 5.5. Son ricos en materia orgánica, de excelentes condiciones físicas, con predominio de alófana en la fracción arcilla y poseen óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, factores todos que influyen negativamente en la disponibilidad de nutrientes para el cafeto (Valencia, 1999).

Debido a las condiciones de alta pluviosidad de la zona cafetera (media anual superior a 1.200 mm), la percolación del agua a través del suelo provoca

1. Estudiante del Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Manejo de Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. mariaeugenia@hawaii.com

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

lixiviación y pérdida de elementos, principalmente de bases. El Al intercambiable ha estado involucrado y se reconoce ampliamente como un factor determinante de la acidez del suelo (Ma *et al.*, 2001, Schreffler and Sharpe, 2003). La corrección de la acidez está ligada a la aplicación de cal y yeso, los cuales tienen efecto benéfico al precipitar el Al y al mejorar la disponibilidad de fósforo, molibdeno, calcio y magnesio, e incrementar la actividad microbiana (Kamprath, 1970).

Pero los agricultores de la zona cafetera colombiana asocian estas labores con prácticas de fertilización que como correctora de acidez, pues puede observarse que el desarrollo radical de los cultivos es adecuado y no presentan trastornos fisiológicos, contrastando con los valores de Al intercambiable ( $> 20 \text{ cmol/kg}$ , como es el caso de algunos suelos de la Sub-Estación "El Rosario" de la Federación Nacional de Cafetos, en el municipio de Venecia, departamento de Antioquia, según análisis de caracterización de suelos del Laboratorio de Suelos de Cenicafé de 1997 - 2000), lo que sugiere que el método para determinar este elemento puede estar sobreestimándolo, como ya lo había mencionado Gottlein (1998), generándose un

problema de mal uso y manejo de estos suelos al recomendar los correctivos (se sugiere aplicar entre 1 - 1.5 t/ha de cal/me Al, dosis muy altas que repercuten negativamente en las propiedades químicas del suelo al sobre encalar).

El objetivo general de esta investigación fue determinar las fuentes de acidez en los suelos de estudio, a través de la utilización de métodos de laboratorio, considerando las fases sólida y líquida del suelo permitiendo el análisis de su composición química.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se tomaron muestras de suelo en veinte sitios (localidades) con características ándicas de las Unidades Chinchiná, Montenegro, Piendamó y Timbío, en los departamentos de Caldas, Antioquia, Quindío y Cauca, respectivamente (Tabla 1), en los primeros 30 cm del horizonte A de cada perfil. Fueron muestras simples tomadas en cafetales que no presentaron influencia de manejo. Se utilizó la información de 1997 al 2000 del Laboratorio de Química Agrícola, Cenicafé, para seleccionar suelos con valores de Al intercambiable  $> 1.5 \text{ cmol/kg}$ .

**Tabla 1. Clasificación de los suelos de estudio según Federación Nacional de Cafeteros (Unidad de suelo) y según Soil Survey Staff (1998) (Clasificación taxonómica).**

Muestra	Unidad de Suelo	Clasificación taxonómica	Muestra	Unidad de Suelo	Clasificación taxonómica
1	Chinchiná CH	Thaptic Fulvudands	11	Timbío TI	Pachic Melanudands
2	Chinchiná CH	Typic Melanudands	12	Timbío TI	Pachic Melanudands
3	Chinchiná CH	Pachic Melanudands	13	Piendamó PI	Typic Melanudands
4	Chinchiná CH	Acruoxic Fulvudands	14	Piendamó PI	Acruoxic Fulvudands
5	Chinchiná CH	Acruoxic Fulvudands	15	Piendamó PI	Acruoxic Fulvudands
6	Chinchiná CH	Typic Melanudands	16	Piendamó PI	Alic Hapludands
7	Chinchiná CH	Pachic Fulvudands	17	Montenegro MN	Spodic Dystrudepts
8	Chinchiná CH	Pachic Melanudands	18	Montenegro MN	Humic Dystrudepts
9	Timbío TI	Acruoxic Melanudands	19	Montenegro MN	Spodic Dystrudepts
10	Timbío TI	Acruoxic Fulvudands	20	Montenegro MN	Acruoxic Fulvudands

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

Se efectuaron análisis químicos, propiedades ándicas (Densidad aparente, retención de fósforo, Al-Fe oxalato) y otras determinaciones como índice melánico, extracción de Al-Fe pirofosfato y retención de humedad según las metodologías del Laboratorio de Química Agrícola de Cenicafé (Franco, 1998).

Las determinaciones se realizaron por triplicado para cada una de las localidades, permitiendo obtener el promedio de las variables y realizar un análisis de la información a través de una estadística descriptiva basados en un análisis multivariado:

1. Determinación de Al (Franco, 1998), con tres concentraciones de KCl (0.001 - 0.1 y 1N).

2. Determinación de fuentes inorgánicas causantes de acidez (titulaciones). A una muestra seca de suelo (2.5 g) se agregaron 275 ml del solvente (agua, NaCl o KCl) y se adicionaron 0.2 ml de las soluciones [NaOH 0.1 N; Ba(OH)<sub>2</sub> 0.05 N; Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 0.1N y NaF 1N en agua y NaOH en una solución de NaCl 1N y KCl 1N] y se registraron los valores de pH y conductividad eléctrica. Los análisis se hicieron siguiendo la metodología utilizada por Dewan y Rich (1970).
3. Determinación de fuentes orgánicas causantes de acidez (acidez total). Se separaron los ácidos húmicos de los fulvicos utilizando el método Nagoya

- (Kumada, 1987), y los cálculos se realizaron siguiendo las recomendaciones de Stevenson (1982) para la determinación de grupos ácidos y acidez total.
- Determinación de la capacidad complejante de la materia orgánica sobre el Al. En una base de extracto acuoso y en una solución de KCl 1M, se complejó el Al con una solución de NaF y se cuantificó el flúor residual mediante la utilización de un electrodo de flúor, adaptado a un pHmetro, calibrado para lecturas en unidades pF. Todas las muestras se trabajaron a temperatura ambiente (24°C) (Hodges, 1987). Se midieron el pH y la conductividad eléctrica. El cálculo de los coeficientes de actividad se realizó siguiendo la ecuación de Davis y la actividad del Al se realizó según Lindsay (1979) y con el programa de SOILSLN (Wolt, 1988).
  - Determinación de aniones y cationes en la solución del suelo. A muestras de suelo húmedo (33 KPa) se le extrajo la solución del suelo por centrifugación y se hicieron análisis de pH y CE, por los métodos potenciométricos y conductométricos. Las determinaciones de aniones y cationes se realizaron en el equipo HPLC, teniendo en cuenta las determinaciones mencionadas anteriormente, y siguiendo las metodologías reportadas por Elkhattib, Hern y Staley (1987).
  - Determinación de la composición química de los lixiviados. Se lixiviaron suelos con  $H_2SO_4$  0.001M, en columnas de PVC. Se realizaron determinaciones de pH, Al, CE, Ca, Mg, Na, K, y se relacionaron estos valores con los de la solución del suelo. Se empacaron 250 g de suelo con un contenido de humedad de 33 KPa, en columnas de PVC (60 cm de largo y diámetro de 5 cm); en la base se instaló una malla para permitir la salida del efluente. Se adicionaron volúmenes de  $H_2SO_4$  0.001M, dependiendo de la porosidad. A los lixiviados se determinaron los cationes (absorción atómica), pH y CE. En total se hicieron seis aplicaciones de la solución (Nielsen y Biggar, 1961).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características químicas

El pH fue el parámetro más uniforme en todas las muestras de las cuatro Unidades (Tabla 2), contrastando con el criterio de Unidad, lo que sugiere que el manejo de los suelos está influyendo en estas características. Son suelos con altos contenidos de materia orgánica y contenidos variable de Al intercambiable y bajos en cationes intercambiables. Según las propiedades ándicas, los suelos de la Unidad Montenegro se

clasificaron como Inceptisoles. Las otras muestras cumplieron los requisitos para ser clasificadas dentro del Orden Andisol. Son, en su mayoría, suelos con predominio de alófana (de acuerdo con la relación Alp/Alo: Alofánico  $< 0.5$  y No alofánico  $> 0.5$ ). Predomina el Si en la alófana, lo que favorece la formación de Imogolita, por consiguiente, son suelos con predominio de materiales no cristalinos en la fracción mineral (Shoji *et al.*, 1993).

### Determinación de Al con diferentes concentraciones de KCl

El contenido de Al aumentó a medida que se incrementó la concentración del extractante (Tabla 4).

Los suelos correspondientes a la Unidad Chinchiná presentaron mayores contenidos de Al intercambiable en todas las concentraciones de KCl y los de la Unidad Montenegro presentaron los valores más bajos. La variación en el contenido de Al no concordó con la uniformidad de los suelos que deberían tener al ser clasificados dentro de Unidades, como ocurrió con las marcadas diferencias en las características químicas y propiedades ándicas de las muestras de suelos de este estudio. La variabilidad puede deberse al manejo que se hace a los suelos, y no a la influencia del contenido de materia orgánica ni la mineralogía. Se confirmó que el KCl como solución extractora no es selectivo en la determinación del Al intercambiable, como se puede notar la alta variabilidad en las Unidades de Suelos, pues ésta puede estar determinando diferentes formas de Al que no son necesariamente tóxicas para los cultivos, además del efecto que tiene la mineralogía de los suelos.

### Determinación de fuentes inorgánicas causantes de acidez

Los resultados (Tablas 5 y 6) mostraron ligero incremento en los valores de las variables, estabilizándose relativamente rápido en respuesta a la adición de las soluciones, presentando valores de pH y CE finales muy cercanos a los iniciales, para todos los suelos, cuando se utilizaron las soluciones de NaOH,  $Ba(OH)_2$  y  $Na_2B_4O_7$  disueltas en agua. Con la adición de las otras soluciones se presentaron ligeros incrementos o cambios más bruscos pero finalmente lograron el equilibrio y los valores se volvieron constantes, lo que permite decir que las fuentes inorgánicas no son responsables de la acidez potencial de estos suelos, al no responder a las titulaciones realizadas. Las titulaciones de un mismo suelo son afectadas por numerosos factores, en donde se pueden mencionar la temperatura am-

Tabla 2. Datos de caracterización química de los suelos de estudio.

Unidad de Suelo	Muestra	pH	MO (%)	P (ppm)	k	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	Zn	Cu
CH	1 - Palestina. Caldas	5.1	11.0	3	0.19	1.6	0.6	0.6	189	14	4	5
CH	2 - Chinchiná. Caldas	5.6	10.4	1	0.05	0.9	0.1	0.2	203	15	4	2
CH	3 - Jericó. Antioquia	5.5	20.9	1	0.28	1.2	0.8	0.8	232	21	3	10
CH	4 - Andes. Antioquia	5.2	16.2	1	0.10	0.1	0.1	1.2	156	37	4	4
CH	5 - Jardín. Antioquia	5.6	22.6	0	0.07	0.7	0.1	0.6	176	29	8	2
CH	6 - Jardín. Antioquia	4.9	24.8	1	0.11	0.2	0.1	3.3	139	13	2	3
CH	7 - Concordia. Antioquia	5.1	18.4	1	0.06	0.0	0.1	2.3	211	14	6	4
CH	8 - Venecia. Antioquia	4.5	24.0	8	0.17	0.3	0.1	3.5	322	11	2	8
TI	9 - El Tambo. Cauca	5.5	21.2	1	0.09	0.1	0.1	0.9	166	7	3	2
TI	10 - Popayán. Cauca	4.9	16.9	1	0.14	0.1	0.1	1.2	124	14	6	3
TI	11 - Timbío. Cauca	5.3	18.0	1	0.31	0.8	0.6	1.0	212	21	3	3
TI	12 - El Tambo. Cauca	5.3	18.3	2	0.14	1.7	0.6	1.0	165	19	4	4
PI	13 - Piendamó. Cauca	5.2	22.5	2	0.35	2.6	1.6	0.2	177	5	3	3
PI	14 - Piendamó. Cauca	5.6	18.2	1	0.11	0.2	0.1	0.4	144	1	2	3
PI	15 - Piendamó. Cauca	5.1	19.7	1	0.26	0.6	0.3	1.1	94	11	2	10
PI	16 - Morales. Cauca	5.3	29.9	3	0.12	0.2	0.1	2.8	152	13	21	2
MN	17 - Montenegro. Quindío	5.2	6.2	20	0.13	2.9	0.2	0.6	246	5	3	4
MN	18 - Montenegro. Quindío	5.3	4.1	9	0.87	4.6	1.0	0.1	430	36	8	27
MN	19 - Montenegro. Quindío	5.1	4.4	7	0.05	0.6	0.1	1.1	150	10	2	1
MN	20 - Circasia. Quindío	5.3	9.4	1	0.12	0.2	0.1	0.7	103	11	2	1

CH: U. Chinchiná. TI: U. Timbío. PI: U. Piendamó. MN: U. Montenegro. pH: 1:1 suelo-agua, potenciométrico. %MO: Walkley Black. P: Bray II, colorimétrico. Bases: Acetato de amonio IN, absorción atómica. Menores: Acetato de amonio y EDTA, absorción atómica. Al: KCl IN, absorción atómica.

**Tabla 3. Propiedades ándicas y fracción mineral de los suelos de estudio calculados teóricamente (Shoji *et al.*, 1993).**

Muestra	Unidad de Suelo	Da Mg m <sup>-3</sup>	Ret P %	Alo+1/2Feo	Alófana de la frac. Arcilla (%)	Al/Si	Alp/Alo	Ferrihidrita (%)
1	CH	0.85	92.96	2.98	7.28	2.47	0.39	1.31
2	CH	0.80	95.78	2.92	7.93	2.32	0.38	1.45
3	CH	0.70	98.59	4.52	10.64	1.45	0.46	2.13
4	CH	0.59	99.06	4.82	9.42	1.82	0.41	2.45
5	CH	0.64	98.12	5.31	10.71	1.74	0.38	2.07
6	CH	0.51	99.06	4.83	9.35	1.42	0.53	1.80
7	CH	0.51	97.47	2.90	3.71	1.92	1.00	2.40
8	CH	0.57	98.41	4.94	7.93	1.64	0.54	2.53
9	TI	0.50	99.06	5.65	6.50	3.43	0.32	2.21
10	TI	0.58	98.59	5.36	13.85	2.01	0.25	2.24
11	TI	0.59	99.06	6.23	11.92	2.57	0.23	2.16
12	TI	0.78	98.59	4.92	12.78	1.71	0.32	2.13
13	PI	0.42	99.06	6.18	11.00	1.94	0.33	2.67
14	PI	0.62	99.06	5.46	8.85	2.41	0.33	3.28
15	PI	0.57	99.06	5.42	9.57	1.63	0.45	2.81
16	PI	0.53	98.59	4.60	3.71	2.10	0.91	3.74
17	MN	1.20	55.91	0.93	1.50	5.29	0.90	0.78
18	MN	1.27	41.84	0.81	1.00	4.45	1.60	1.31
19	MN	1.14	67.17	1.29	3.21	4.32	0.51	0.75
20	MN	0.90	91.09	2.30	5.78	2.62	0.47	1.02

Da, Ret P, Alo+1/2Feo: Propiedades ándicas. Alo: Al oxalato de amonio. Feo: Fe oxalato de amonio. Alp: Al pirofosfato de sodio. Al/Si: (Alo/Alp)/Sio, Alófana rica en Si (cercano a 2) o en Al (cercano a 1). Alp/Alo: Andisoles alofánicos (<0,5) o no alofánicos (>0,5). Ferrihidrita: Feo \* 1,7. alófana de la fracción arcilla: Sio \* 7,14 (Sio: Si oxalato de amonio

**Tabla 4. Promedios y variación del Al (cmol/kg suelo) en las cuatro Unidades de Suelo estudiadas, utilizando tres concentraciones de KCl.**

Unidad de Suelo	Chinchiná (CH)		Montenegro (MN)		Piendamó (PI)		Timbío (TI)		
	Concentración KCl	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 5. Valores iniciales y finales promedios de la titulación potenciométrica en las cuatro Unidades de Suelo con las seis soluciones.**

Unidad de Suelo	NaOH			Ba(OH) <sub>2</sub>			Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>			NaF			NaOH (KCl)			NaOH (NaCl)		
	pH i	pH f	cmol/ kg	pH i	pH f	cmol/ kg	pH i	pH f	cmol/ kg	pH i	pH f	cmol/ kg	pH i	pH f	cmol/ kg	pH i	pH f	cmol/ kg
CH	6.8	7.6	1.02	5.1	6.1	7.95	6.0	7.6	1.6	9.8	7.8	3.6	6.2	8.3	11.8	5.6	7.1	6.6
TI	6.5	7.7	1.02	5.7	7.0	27.5	5.7	7.5	1.35	9.9	7.8	3.7	6.2	7.5	9.8	5.1	7.0	7.2
PI	6.4	7.6	1.23	5.8	7.1	22.5	6.0	7.5	1.32	9.9	7.8	4.7	6.0	7.0	6.2	5.5	7.2	7.7
MN	6.6	8.5	1.13	5.8	7.5	23.8	6.0	8.0	1.2	9.7	7.8	1.13	6.1	7.7	3.2	5.6	7.7	3.1

pHi: pH inicial, pHf: pH final

biente, la velocidad o intensidad de agitación de las muestras mientras la titulación, velocidad de adición del titulante, y de factores del suelo como la mineralogía, lo cual hace que este procedimiento se prolongue hasta alcanzar un equilibrio. En este caso se mantuvieron constantes estos factores y puede decirse

que sólo los relacionados con el suelo (contenido de materia orgánica y mineralogía), difirieron en todos los casos.

Las titulaciones potenciométricas y conductométricas se utilizaron para medir la concentración de H<sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup> en los suelos, esperando que los puntos finales de

**Tabla 6. Valores iniciales y finales promedios de la titulación conductométrica en las cuatro Unidades de Suelo con las seis soluciones.**

Unidad de Suelo	NaOH			Ba(OH) <sub>2</sub>			Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>			NaF			NaOH (KCl)			NaOH (NaCl)		
	CE	cmol/	kg	CE	cmol/	kg	CE	cmol/	kg	CE	cmol/	kg	CE	cmol/	kg	CE	cmol/	kg
	i	f		i	f		i	f		i	f		i	f		i	f	
CH	15.1	17.7	1.2	15.3	18.5	7.9	21.2	34.8	1.6	58.5	54.7	3.6	110.1	98.1	11.8	80.0	69.6	6.6
TI	15.3	19.5	1.0	41.2	50.2	27.5	20.4	32.9	1.3	56.2	52.3	3.7	105.1	98.9	9.8	85.0	81.0	7.2
PI	17.4	21.9	1.2	44.1	54.6	22.5	24.2	33.4	1.3	52.8	43.5	4.7	106.2	101.8	6.2	83.6	81.6	7.7
MN	15.4	18.7	1.13	41.2	53.9	23.8	27.5	34.2	1.2	60.2	61.5	1.1	105.3	104.1	3.2	85.4	83.5	3.1

CEi: Conductividad eléctrica inicial (uS/cm). CEf: Conductividad eléctrica final (uS/cm).

las valoraciones se presentaran con cambios fuertes en las variables, indicando un punto de equivalencia. Los resultados obtenidos no permitieron llegar a una conclusión precisa de este cambio, pues no se presentaron cambios bruscos, debido probablemente al alto contenido de materia orgánica que actuó como factor amortiguador.

#### Determinación de fuentes orgánicas causantes de acidez (acidez total)

No fue posible obtener resultados de la extracción y cuantificación de los grupos carboxílicos en los suelos de este estudio, siguiendo la metodología propuesta por Stevenson (1982), debido a que las muestras presentaron un valor pH inicial (pH = 10.1 en promedio) mayor que el final (pH = 9.8). Se pensó que podía haber error en la extracción de las muestras de ácidos húmicos, por lo cual se hicieron diferentes repeticiones, pero arrojaron los mismos resultados, lo cual indica que en estos suelos se debe utilizar otra metodología de extracción y cuantificación de los grupos carboxílicos y en general de los ácidos orgánicos.

En los suelos de la Unidad Chinchiná (Tabla 7) el contenido de materia orgánica fue alto, pero la acidez total fue la más baja. La similitud en el contenido de acidez total y de materia orgánica en las Unidades Timbío y Piendamó puede atribuirse al origen y manejo de estos suelos; los suelos de la Unidad Montenegro tuvieron el contenido de materia orgánica más bajo pero la acidez total fue similar a las Unidades Timbío y Piendamó.

El contenido de acidez total encontrado está por debajo del promedio de los suelos ácidos (890 - 1.420 cmol/kg suelo), y de los suelos tropicales (820 - 1.030 cmol/kg suelo), los cuales tienen un rango entre 640 - 1.420 cmol/kg suelo (Stevenson, 1982). Estos resultados indican que la acidez total de los ácidos húmicos no fue la fuente de acidez en los suelos de estudio, debido posiblemente a la naturaleza de los mismos.

**Tabla 7. Acidez total y contenido de materia orgánica en los suelos de estudio.**

Unidad de Suelo	Perfil	%MO	Acidez total (cmol/kg suelo)
CH	1	11.0	2.44
CH	2	10.4	3.79
CH	3	20.9	2.03
CH	4	16.2	2.33
CH	5	22.6	3.94
CH	6	24.8	4.53
CH	7	18.4	3.69
CH	8	24.0	3.03
TI	9	21.2	22.9
TI	10	16.9	13.92
TI	11	18.0	14.57
TI	12	18.3	13.74
PI	13	22.5	13.16
PI	14	18.2	15.27
PI	15	19.7	19.40
PI	16	29.9	12.73
MN	17	6.2	13.89
MN	18	4.1	33.66
MN	19	4.4	13.18
MN	20	9.4	12.45

#### Determinación de la capacidad complejante de la materia orgánica sobre el Al

El Al (Tablas 8 y 9) está presente en estos suelos en forma libre como AlOH, Al(OH)<sub>2</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, Al(OH)<sub>4</sub> (calculados con el programa SOILSLN), o haciendo parte de los complejos con Al-F y Al-MO, aunque en concentraciones muy bajas, con valores cercanos a cero.

Las dos metodologías de especiación (Lindsay y SOILSLN) se utilizaron para comprobar la capacidad complejante de la materia orgánica soluble que forma especies con el Al extraído con KCl y agua. En la metodología Lindsay se estimó la concentración del Al ligado a la materia orgánica y con el programa SOILSLN se estimó la actividad de (F-) y (Al<sup>3+</sup>), suponiendo que no existe la capacidad quelatante de la materia orgánica. Si en la solución de KCl y en agua existiera una base de Lewis más fuerte que el F-, por ejemplo la materia orgánica soluble, las actividades del Al

**Tabla 8. Especiación del Aluminio en los suelos de estudio en solución acuosa calculados por dos metodologías.**

Metodología Lindsay, 1979							
Unidad de Suelo	pH	CE mScm <sup>-1</sup>	[Al <sub>T</sub> ] molL <sup>-1</sup>	(F-) Libre (molL <sup>-1</sup> )	[Al-F] molL <sup>-1</sup>	(Al <sup>3+</sup> ) libre cmolkg <sup>-1</sup>	[ A I - M O ] cmolkg <sup>-1</sup>
CH	5.2	0.08	1.78E-05	1.07E-03	1.68E-05	3.36E-10	1.0E-03
TI	5.6	0.11	1.74E-05	1.01E-03	1.68E-05	3.52E-10	6.0E-04
PI	4.8	0.17	4.92E-06	9.89E-04	4.88E-06	1.0E-10	4.0E-05
MN	5.6	0.09	1.21E-05	3.07E-03	1.14E-05	3.3E-13	7.0E-04
Programa SOILSLN (Wolt, 1988)							
Unidad de Suelo	[Al <sup>3+</sup> ] molL <sup>-1</sup>	AlOH molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>2</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>3</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> molL <sup>-1</sup>	Al-F molL <sup>-1</sup>	(F) molL <sup>-1</sup>
CH	10E-9.1	10E-8.9	10E-7.4	10E-8.7	10E-11.7	10E-4.8	10E-4.2
TI	10E-9.2	10E-8.5	10E-6.7	10E-7.6	10E-10.1	10E-4.8	10E-4.2
PI	10E-10.1	10E-1.3	10E-9.2	10E-10.9	10E-14.2	10E-5.3	10E-4.05
MN	10E-9.5	10E-8.9	10E-7.05	10E-7.9	10E-10.5	10E-4.9	10E-4.11

**Tabla 9. Especiación del Aluminio en los suelos de estudio con solución KCl 1M calculados por dos metodologías.**

Metodología Lindsay, 1979							
Unidad de Suelo	pH	CE mScm <sup>-1</sup>	[Al <sub>T</sub> ] molL <sup>-1</sup>	(F-) Libre (molL <sup>-1</sup> )	[Al-F] molL <sup>-1</sup>	(Al <sup>3+</sup> ) libre cmolkg <sup>-1</sup>	[ A I - M O ] cmolkg <sup>-1</sup>
CH	4.08	111.8	3.9E-04	3.2E-04	3.2E-04	1.18E-05	0.072
TI	3.95	112.0	6.8E-05	3.6E-04	5.9E-05	5.64E-08	0.0081
PI	3.95	111.8	1.3E-04	5.5E-04	1.0E-04	1.09E-08	0.027
MN	3.85	111.1	4.0E-05	5.4E-04	3.8E-05	4.77E-09	0.0016
Programa SOILSLN (Wolt, 1988)							
Unidad de Suelo	[Al <sup>3+</sup> ] molL <sup>-1</sup>	AlOH molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>2</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>3</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> molL <sup>-1</sup>	Al-F molL <sup>-1</sup>	(F) molL <sup>-1</sup>
CH	10E-3.6	10E-5.1	10E-5.2	10E-7.7	10E-11.6	10E-4.0	10E-6.4
TI	10E-5.5	10E-7.1	10E-7.3	10E-9.9	10E-14.1	10E-4.2	10E-5.1
PI	10E-4.4	10E-6.0	10E-6.3	10E-8.9	10E-13.01	10E-4.1	10E-5.7
MN	10E-6.6	10E-8.3	10E-8.7	10E-1.5	10E-15.6	10E-4.4	10E-4.5

serían mayores que las encontradas cuando se hace el cálculo con SOILSLN, situación que no es cierta. La concentración del complejo Al-MO en ambas soluciones fue casi cero. Este resultado indica probablemente que para estos suelos el Al libre extraído está formando complejos con bases de Lewis diferentes de los grupos de la materia orgánica, los cuales no son tóxicos para las plantas.

#### Determinación de aniones y cationes en la solución del suelo

Los resultados mostraron que la solución no contenía fosfatos o que no fueron detectados debido posiblemente a bajas concentraciones. Esto puede explicarse debido a la retención alta de fosfatos que caracteriza a los suelos con propiedades ándicas, de ahí que no se presenten resultados de esta variable.

Las bajas concentraciones de Al en la solución (Tabla 10) no concordaron con el Al determinado como intercambiable, y la variación dentro de cada Unidad de suelo puede atribuirse a posible manejo de suelos, prácticas de fertilización que pudieron estar enfocadas a suprir los requisitos de Ca y Mg, de acuerdo con los resultados obtenidos. Con el programa SOILSLN (Wolt, 1988) se calculó la actividad del Al en la solución del suelo y las formas en las cuales se encuentra en estas muestras (Tabla 11).

Es importante notar que fue muy poca la concentración del Al que se encuentra en esta fase, y es quizás la respuesta más importante en la investigación, al permitir decir con base en estos 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 registrado como intercambiable no se relaciona con la actividad

**Tabla 10. Composición química de la solución del suelo para las muestras de estudio.**

Unidad de suelo	pH	CE uS/cm	Al <sup>3+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
							ppm					
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	24.02	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); Al<sup>3+</sup>: Colorimetría; aniones y cationes por HPLC. Los valores de cero no fueron detectados.

**Tabla 11. Especiación del Al en la solución del suelo para las muestras de estudio Unidad de suelo**

Unidad de Suelo	Al <sup>3+</sup> molL <sup>-1</sup>	AlOH molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>2</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>3</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> molL <sup>-1</sup>	Al-SO <sub>4</sub> molL <sup>-1</sup>
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

de éste en la solución del suelo. Según los resultados se puede decir que existe una fuente orgánica o inorgánica insoluble que retiene el Al, permitiendo el desarrollo radical de las plantas sin presentar problemas de toxicidad por este elemento.

#### Determinación de la composición química de los lixiviados

El análisis de los lixiviados mostró que el pH aumentó consecutivamente hasta alcanzar el equilibrio; la conductividad hidráulica disminuyó un poco a tra-

vés de las aplicaciones del ácido sulfúrico, pero alcanzó finalmente el equilibrio; el Al presentó un descenso hasta alcanzar el equilibrio. El Ca disminuyó hasta alcanzar un equilibrio (muestra 3. Unidad Chinchiná). Cuando se dice equilibrio se refiere a que los valores se vuelven constantes con las diferentes aplicaciones de ácido, y éstas son cada vez mayores (Figura 1). También se utilizó el programa SOILSLN para analizar la información (Tabla 12), que es básicamente un estudio de la especiación del Al.

**Tabla 12. Especiación del Al en los lixiviados de las Unidades de Suelo**

Unidad de Suelo	Al <sup>3+</sup> molL <sup>-1</sup>	AlOH molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>2</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>3</sub> molL <sup>-1</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> molL <sup>-1</sup>
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

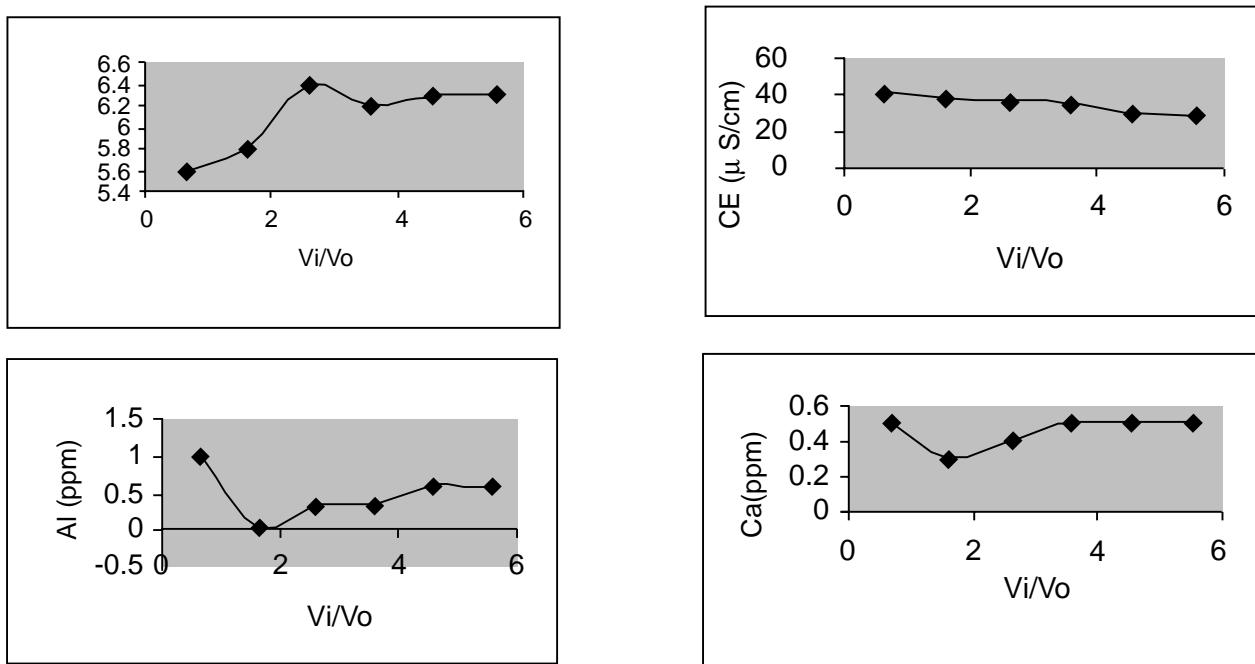


Figura 1. Variación de algunos parámetros determinados en los lixiviados [relación del volumen total adicionado (Vi) sobre el volumen inicial (Vo) de ácido] en la muestra Jericó (3), Unidad Chinchiná.

La concentración de las diferentes formas del Al en los lixiviados fue muy baja como para ser responsable de la acidez de estos suelos, al igual que en el análisis que se realizó de la solución del suelo.

El estudio de la lixiviación como fuente de acidez mostró como disminuyó la capacidad neutralizante de acidez (CNA) del suelo. La CNA aunque disminuyó, no llegó en este experimento a liberar Al tóxico a los lixiviados.

### CONCLUSIONES

Para los suelos de estudio el KCl no fue selectivo a la hora de extraer el Al, las marcadas variaciones en las concentraciones lo demuestran. Este método no estima la toxicidad de Al de los suelos. Las muestras analizadas no presentaron respuestas significativas que pudieran indicar la presencia de fuentes inorgánicas causantes de acidez. La concentración del complejo Al-MO fue cercana a cero en las dos soluciones, resultado interesante si se tiene en cuenta que se esperaba determinar la afinidad de la materia orgánica con el Al para formar complejos. Este resultado indica probablemente que para estos suelos el Al libre calculado proviene de fuentes inorgánicas que no son tóxicas para las plantas. Se encontró muy poca concentración del Al en la solución del suelo, que es quizás la respuesta más importante en la investigación, al permitir decir, con base en estos resultados, que es esa la razón por la cual las plantas de café crecen y se desarrollan bien en estos

suelos, y que el Al registrado como intercambiable no proviene de la solución del suelo.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Cenicafé por el apoyo financiero y logístico que permitió la realización de esta investigación.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Dewan, H.C.; Rich, C.I. Titration of acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34 (1): 38-44. 1970.
2. Elkhatib, E.A.; Hern, J.L.; Staley, T.E. A rapid centrifugation method for obtaining soils solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 (3): 578-583. 1987.
3. Franco, A. H. F. Métodos químicos de análisis de suelos. En: Cenicafé - Colombia. Informe anual de labores 1997 - 1998. Chinchiná, 1998.
4. Hodges, S.C. Aluminum speciation: A comparison of five methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51 (1): 57-63. 1987.
5. Kamprath, E.J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 252 - 254. 1970.
6. Kumada, K. Chemistry of soil organic matter. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1987. 241p.
7. Lindsay, W. L. Chemical equilibria in soils. New York: Wiley, 1979. 449p.
8. MA, J.F.; Ryan, P.R.; Delhaize, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends in Plant Science*, 6 (1): 273-278. 2001.
9. Malagón, D.; Pulido, C.; Llinas, R. Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos. *Suelos Ecuatoriales*. 22 (1): 50 - 68. 1992.
10. Nielsen, D.R. and Biggar, JW. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25 (1): 1 - 5. 1961.

11. Shoji, S.; Nanzyo, M; Dahlgren, R. Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Amsterdam, Elsevier 1993. 288 p.
12. Schreffler, A.M. and W.E. Sharpe. Effects of lime, fertilizer, and herbicide on forest soil and soil solution chemistry, hardwood regeneration, and hardwood growth following shelter wood harvest. *Forest Ecol. Manag.* 177: 471 - 484. 2003.
13. Soil survey staff. Keys to soil taxonomy. 8th ed. Washington, 1998. 327 p.
14. Stevenson, F.J. Humus chemistry. New York: Willey, 1982. 232p.
15. Valencia, A.G. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná: Agroinsumos del Café - Cenicafé, 1999. 94 p.
16. Wolt, J.D. A program for computation of ion activities of soil solution components. 1988.