

IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE ALUMINIO EN UN ANDOSOL DEL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO

O. Acevedo-Sandoval ¹, F. Prieto-García ² y A. Gordillo-Martínez ²

¹ Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. acevedo@uaeh.edu.mx

² Centro de Investigaciones Químicas. prietog@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Km. 4.5 carretera Pachuca-Tulancingo, Ciudad Universitaria C.P 42084. Pachuca, Hidalgo. Mex.

Resumen: Se han estudiado las formas de aluminio (intercambiables, interlaminar, labil, asociada a la materia orgánica, y de rango corto) en una secuencia completa de horizontes de un perfil de suelo (Andosol háplico) del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. Los aluminosilicatos cristalinos se incrementaron de 24 a 96 % en relación con la profundidad. Del aluminio interlaminar 35% está formado por hidroxido-Al polimérico no intercambiable el cual se presenta en la capa superior, disminuyendo con la profundidad, este aluminio interlaminar es de formación pedogenética. De los hidróxidos y oxihidróxidos de Al el 20 y 30% se presentan en las capas superficiales, los que pueden estar o no asociados a sustancias húmicas o aluminosilicatos amorfos. Las sustancias húmicas en el horizonte superior dificultan la formación de polímeros hidroxialumínicos. El porcentaje de alofana se incrementa dentro de los primeros 80 cm de profundidad, después de ésta el aluminio forma parte de estructuras cristalinas (haloíta, y caolinita). La distribución vertical de las diferentes formas de Al en el perfil del suelo refleja procesos pedogenéticos, siendo las formas cristalina y amorfa dominantes a través del perfil del suelo, presentándose una mayor acumulación de óxidos e hidróxidos de Al a profundidades mayores de 100 cm.

Palabras clave: alofana, amorfos, oxihidróxidos de aluminio, caolinita, haloíta.

Abstract: Aluminium forms (interchangeable, interlayer, free, organically bound, amorphous) distribution were studied at different depth, in one Andosol haplic from Sierra of Pachuca, Hidalgo Mexico. Al crystalline oxide increased from 24 to 96% with depth. 35% of interlayer aluminium was formed by not interchangeable polymeric hydroxi-Al present in upper layer and decreasing with depth, the interlayer aluminium had pedogenetic origin, 20 and 30% of aluminium hydroxides and oxyhydroxides were found in upper layers, which could be or not associate with humic matter and/or amorphous aluminosilicates. The presence of humic matter in upper difficult the hydroxialuminic polymers formation. Allophan per cent increase in the first 80 cm of depth, in deeper layers, aluminium is forming crystalline structures (halloysite and kaolinite). Different aluminium forms distribution in the soil profile is consequence of pedogenetic processes, being crystalline and amorphous Al the dominant forms in the profile, occurring a higher accumulation of aluminium hydroxides and oxyhydroxides in higher depth .of 100 cm.

Key words: Allophane, amorphous aluminium oxyhydroxides, halloysite, kaolinite.

Acevedo-Sandoval, O., Prieto-García, F. y Gordillo-Martínez, A. (2009): Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21 (3-4): 125-132

Introducción

El aluminio (Al) es el tercer elemento más abundante en la tierra (después del oxígeno y el silicio), constituyendo hasta 8.1% de la corteza terrestre. Zhang *et al.* (1997) mencionan que en el suelo existen cantidades importantes de hidróxidos u óxidos no cristalinos de Al, cuya estructura, composición y función que desempeñan en el suelo no están bien definidas.

El aluminio del suelo tiene un importante efecto en la formación del suelo (McKeague *et al.*, 1986), en la

agregación (Emerson *et al.*, 1986; Jones *et al.*, 2000), en la acidificación (Thomas y Hargrove, 1984), en la retención de cationes y aniones (Hsu, 1989) y en la reducción de la capacidad de intercambio catiónico y propiedades físicas como: estabilidad de agregados, dispersión, floculación, infiltración de agua, erosión y estabilidad de terrenos (Schaefer *et al.*, 1999; Hsu, 1989; Jones *et al.*, 2000), transformación de nutrientes y agente contaminador (Huang, 1990) y, el cambio del carbono orgánico, el balance ecológico y la salud humana (Jansen *et al.*, 2002); así como la presencia del Al en el medio, agua y suelo, puede ocasionar serios

riesgos ecológicos (Huang, 1990; Tan, 1994; Gensemer y Playle, 1999). Los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de Al constituyen un grupo de coloides del suelo que son capaces de adsorber amplias cantidades de metales en traza y tienen además una importante influencia en la sorción y disponibilidad de fosfatos (Zhang *et al.*, 1997).

El aluminio en el suelo se presenta como: microcristales (caolinita, gibbsita), precipitados amorfos $\{Al_2SiO_5, Al(OH)_3, AlPO_4\}$ o como complejos orgánicos e inorgánicos (AlF^{2+} , AlF_2^+ , $AlSO_4^+$), también es considerado tóxico, como Al monomérico inorgánico (Al^{3+} , $AlOH^{2+}$ y $Al(OH)_2^+$) o formas poliméricas inorgánicas, $AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{24}^{7+}$ (conocido como Al_{13}), la presencia de éstos en el suelo se debe a los tectosilicatos, filosilicatos, hidróxidos y aluminosilicatos de rango corto y minerales accesorios (Huang, 1990; Soon, 1993). El Al lábil en el suelo puede encontrarse de varias formas, éste dependerá principalmente del pH y la composición mineralógica del suelo (Zhang *et al.*, 1997). Dubroeuq *et al.* (1998) mencionan que los cambios climáticos y la edad del suelo influyen en las condiciones coloidales de suelos derivados de cenizas volcánicas, por ejemplo: i) complejos humus-Al con polímeros de hidroxil-Al o capas silicatadas 2:1 de hidroxil-Al, ii) alofana e imogolita o ferrihidrita, iii) haloisita.

El objetivo del presente trabajo es investigar las formas de aluminio (intercambiables, interlaminar, lábil, asociada a la materia orgánica, de rango corto) en una secuencia completa de horizontes de un perfil de suelo (Andosol háplico) de la sierra de Pachuca, Hidalgo, México. Esta investigación contribuye al conocimiento del aluminio en suelos volcánicos.

Materiales y métodos

De un levantamiento de suelos realizado en el Municipio Mineral del Chico, Hidalgo, México, se seleccionó un perfil de suelo tipo, clasificado como Andosol háplico (WRB, 1998) y de acuerdo a la Soil Survey Staff (2003) como Typic Hapludands; éste se localiza en Las Ventanas, una localidad del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, entre los $20^\circ 11' 07''$ de latitud norte y los $98^\circ 43' 43''$ longitud oeste, a una altitud de 2,965 m (Figura 1) La zona se ubica dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, caracterizada por rocas volcánicas del Terciario, se cartografía como Grupo Pachuca (Geyne *et al.*, 1963), éste consta de ocho formaciones (Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaina, Cerezo y Tezuantla), con un espesor cercano a los 3,000 m y cuya mayor parte corresponde a andesita y dacita, mientras que sus partes inferior y superior a riolita. El Grupo Pachuca, contiene numerosos intervalos, tanto de toba como de rocas epiclásticas, incluyendo algunos horizontes de caliza

lacustre; descansa en algunos lugares en forma concordante y en otros discordantemente sobre los depósitos clásticos continentales del Terciario inferior y discordantemente sobre rocas más antiguas, la edad se considera como oligocénica-miocénica temprana y media (Geyne *et al.*, 1963; Enciso-De la Vega, 1992).

El clima C(E)(w₂), semifrío subhúmedo con lluvias de verano (el más húmedo de los subhúmedos) con lluvia invernal entre 5 y 10 %, con precipitación pluvial anual de 800 mm y temperatura media anual de 12 °C (Periódico Oficial del Estado de Hidalgo, 2001). El régimen de humedad del suelo es údico, y el régimen de temperatura del suelo mésico (Soil Survey Staff, 1995). En la región de estudio el uso dominante del suelo es forestal y la vegetación natural que predomina es Bosque de Oyamel (*Abies religiosa*).

Se tomaron del perfil muestras alteradas de suelo cada 10 cm, éstas se llevaron al laboratorio donde se secaron al aire. Las muestras de suelo se tamizaron a través de una malla de 2 mm, los métodos empleados para determinar las propiedades físicas y químicas se encuentran en Soil Survey Laboratory (1996) Las variables analizadas fueron: densidad aparente (método del terrón y parafina), densidad real, porcentaje del espacio poroso total, distribución del tamaño de partículas, pH en agua (1:2.5), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables (extraídas con acetato de amonio 1N pH 7.0 y analizadas por espectrometría de emisión en plasma de inducción acoplado). El porcentaje de carbono orgánico se determinó multiplicando $[6.82 (\%Al_p - 0.20)]$ (Nanzyo *et al.*, 1993). La extracción química selectiva de Al para determinar la naturaleza de los materiales de rango corto (activos) y cristalinos (libres) se realizó con los siguientes métodos: extracción de Al lábil se llevó a cabo con ditionito-citrato-bicarbonato, Al_{dcb} , (Mehra y Jackson, 1960); extracción de óxidos amorfos y óxidos hidratados de Al por oxalato ácido de amonio, Al_o , (Smith, 1994); la extracción de Al presente en complejos orgánicos se hizo con pirofosfato de sodio, Al_p , (Smith, 1994) y cloruro de cobre, Al_{cu} (Juo y Kamprath, 1979), todos los análisis se realizaron por duplicado. El contenido de alofana fue estimado usando la fórmula $(Al_o - Al_p)/Si_o$ (Parfitt, 1990). El Al interlaminar se calculó por la diferencia entre el aluminio extraído por ditionito-citrato-carbonato y el extraído por oxalato ácido de amonio. El Al presente en la disolución se determinó mediante espectrometría de emisión en plasma de inducción acoplado, (ICP) marca Perkin Elmer 3000, modelo Lambda 2S. El Al total (Al_t) se determinó por fluorescencia de rayos X, con un espectrómetro secuencial de rayos x SIEMENS SRS 3000. Se determinaron los minerales secundarios presentes en la fracción fina menor que 2 μm , por difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro de rayos X, Phillips modelo X Pert y espectrofotometría de infrarroja en un Perkin Elmer FT-IR System Spectrum GX.

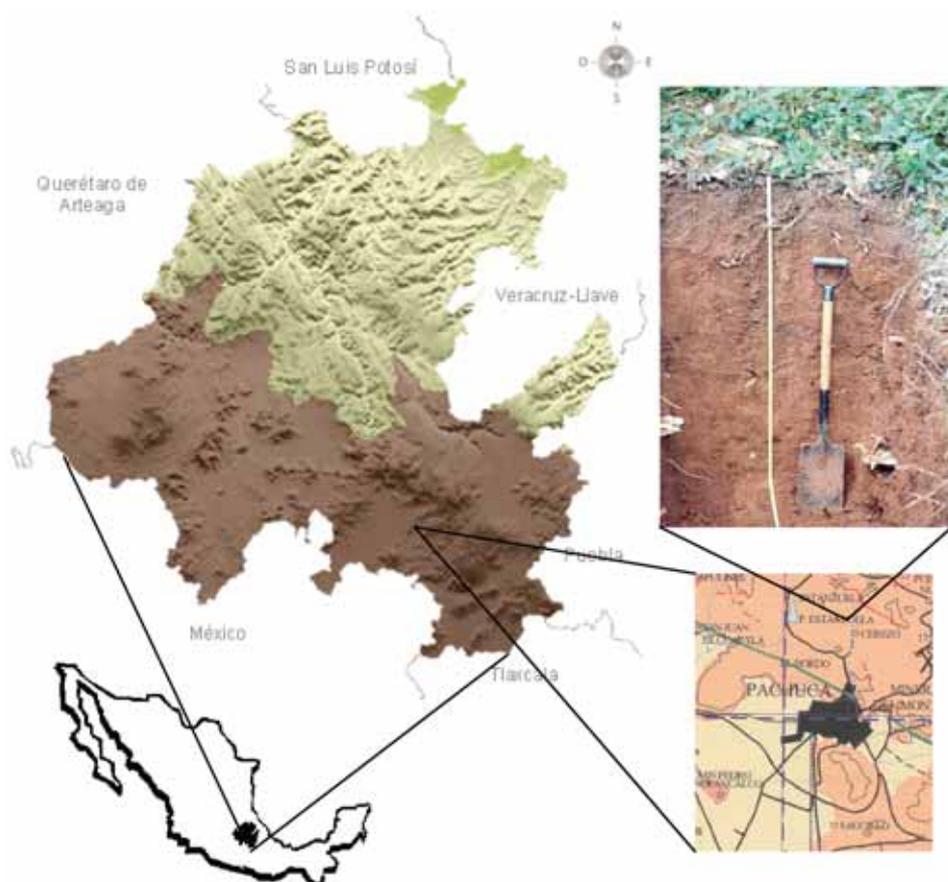


Figura 1.- Ubicación de la zona de estudio, Parque Nacional El Chico, Hidalgo México.

Resultados y discusión

Propiedades físicas y químicas

La tabla 1, reúne las principales propiedades físicas y químicas. El perfil presenta una clase textural franca arenosa a franca, donde predomina la fracción arena con porcentajes de 42 a 65 % en las diferentes capas, los limos varían de 22 a 46 %, éstos disminuyen con la profundidad. Los contenidos de las arcillas presentan un incremento en relación con la profundidad, en los primeros 60 cm (5 a 21 %), entre los 60 y 80 cm el

contenido de éstas disminuye a 7 %, y nuevamente aumenta (27 % de arcilla) entre los 80 y 100 cm, disminuyendo ésta a mayor profundidad.

La densidad aparente, menor de 0.9 Mg/m³, es característica de suelos de tipo Andosol derivados de materiales volcánicos, la densidad real presenta valores menores a 2.31 Mg/m³ lo que indica que los contenidos en minerales ferromagnesianos no son abundantes, el porcentaje de porosidad varia de 49 a 58%. Las características anteriores proporcionan al suelo un medio físico adecuado con buena aireación, buen drenaje, alta resistencia a la erosión hídrica y adecuada porosidad.

Profundidad cm	Densidad Mg m ⁻³		Clase Textural	Arcilla %	pH			M.O. %	*Carbono orgánico %	C.I.C. cmol kg ⁻¹	Bases intercambiables cmol(+) kg ⁻¹				Saturación bases %	C.I.C.E. cmol kg ⁻¹
	Aparente	Real			H ₂ O	KCl	%				Na	K	Ca	Mg		
0 - 10	0.80	1.64	FAr	7.2	5.87	5.05	13.86	5.00	38.58	2.96	2.62	14.47	1.48	55.81	21.83	
10 - 20	0.79	1.85	FAr	5.2	5.97	4.87	8.30	5.56	29.11	1.80	1.61	8.67	1.13	45.38	13.51	
20 - 30	0.80	1.89	FAr	7.2	6.02	5.02	4.14	2.25	26.04	1.64	1.66	5.51	1.05	37.86	10.16	
30 - 40	0.86	2.06	F	19.2	5.99	4.75	2.71	0.97	20.83	2.48	1.62	4.60	1.21	47.58	10.61	
40 - 50	0.88	2.03	F	11.2	5.91	4.70	2.39	2.49	21.89	1.72	1.47	5.19	1.57	45.45	10.75	
50 - 60	0.86	1.98	F	21.2	5.74	4.71	2.36	1.82	22.13	1.90	1.29	5.20	1.44	44.42	10.93	
60 - 70	0.87	1.94	F	9.2	5.58	4.72	2.62	0.82	21.54	1.79	1.19	4.33	1.21	39.55	9.82	
70 - 80	0.85	1.95	F	7.2	5.68	4.77	3.45	1.74	22.25	2.46	1.60	4.39	1.14	43.10	9.79	
80 - 90	0.96	2.07	F	21.2	5.66	4.03	2.17	4.89	22.49	1.69	1.73	4.95	1.86	45.49	12.03	
90 - 100	1.01	2.31	FCAr	27.2	5.82	3.93	0.89	9.22	24.50	1.46	0.02	1.31	0.31	12.65	4.40	
100 - 110	0.97	1.97	FCAr	23.2	5.87	3.92	1.02	3.72	26.27	2.26	1.41	8.13	2.82	55.65	15.62	
110 - 120	1.12	2.13	FCAr	11.2	5.85	3.77	0.38	0.77	24.14	2.16	0.52	3.37	2.16	34.01	8.42	
120 - 130	1.10	2.18	FAr	19.2	5.54	3.53	0.45	0.00	19.88	2.84	0.69	5.51	2.84	59.76	13.15	
130 - 140	0.99	2.31	FAr	13.2	5.50	3.32	0.48	0.00	17.75	2.53	0.74	3.93	2.53	54.82	11.11	
140 - 150	0.99	2.13	FAr	15.2	5.36	3.20	0.51	0.00	17.28	2.20	0.52	3.24	2.20	47.22	9.65	
150 - 160	1.00	2.23	FAr	13.2	5.47	3.38	0.32	0.00	16.57	2.14	0.61	3.59	2.14	51.18	9.80	

F, franco; Ar, arena; C, Arcilla; FAr, franco arenosa; FCAr, franco arcillo arenosa; M.O. materia orgánica; *Carbono orgánico se determinó multiplicando [6.82 (%Al_p - 0.20)] (Nanzzy *et al.*, 1993) CIC, capacidad de intercambio catiónico; CICE, capacidad de intercambio catiónico efectiva (Na+K+Ca+Mg+Al+H).

Tabla I.- Propiedades físicas y químicas del Andosol háplico.

El pH determinado en agua disminuye con la profundidad de 6 a 5.36, el contenido de materia orgánica es alta en el horizonte superior (13.86 % de M.O.) y se reduce con la profundidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta en las primeras capas del perfil ($39 \text{ cmol}+\text{kg}^{-1}$) debido a la presencia de algunos amorfos de tipo alofánico y a complejos humus-Al (Shoji *et al.*, 1993) y disminuye con la profundidad. La saturación de base es media; el porcentaje de saturación de aluminio se incrementa en relación con la profundidad (de 1 a 30 %). En la Tabla 2 se presentan los valores de Al intercambiable, se observa que dentro de los primeros 60 cm del perfil del suelo no presentan problemas de fitotoxicidad por Al. A mayor profundidad el Al intercambiable muestra valores mayores de $1.3 \text{ cmol}+\text{kg}^{-1}$ que denota problemas de toxicidad para el desarrollo del bosque de oyamel. Sosa (1994) estableció que niveles de 1.24 meq de Al /100g en suelo pueden ocasionar problemas de fitotoxicidad inhibiendo el desarrollo radicular.

La Figura 2 presenta la distribución del Al por diferentes extractantes en el perfil del suelo, las primeras capas presentan una mayor extracción de Al_{dcb} que Al_o y Al_p ; el Al_{dcb} y Al_p disminuyen con la profundidad, estos resultados no coinciden con lo expuesto por McKeague y Day (1966) donde señalan un incremento del Al_{dcb} y Al_p en relación con la profundidad para diferentes clases de suelos. La mayor presencia de Al_{dcb} en los primeros 20 cm indica la baja presencia de aluminosilicatos cristalinos, como la imogolita o el alofana, la presencia de este Al_{dcb} puede justificarse por la sustitución de Fe por Al (Acevedo *et al.*, 2004).

A profundidades mayores de 20 cm, la extracción de Al_o es mayor que el Al_{dcb} , esto alude la presencia de aluminosilicatos de bajo grado de cristalinidad (Dahlgren y Ugolini, 1991); en este sentido, si se calcula la relación molar Si/Al ($\text{Al}_o - \text{Al}_p/\text{Si}_o$) se obtienen valores entre 2.1 y 2.5 (media 2.3) lo que indica la presencia de minerales de alofana/imogolita ricos en Al; este alofana se formó en un medio ambiente

lixiviado, posiblemente porque el sílice en la solución del suelo es menor de $10 \text{ } \mu\text{g ml}^{-1}$ (Parfitt *et al.*, 1984).

El aluminio amorfo representa 30 % del total de aluminio del suelo, dentro de los primeros 30 cm del perfil, el cual disminuye con la profundidad, a excepción de la capa 70-80 que presenta un incremento (26.3 % de óxidos e hidróxidos amorfos de aluminio, Figura 2) y decrece nuevamente (1 % de óxidos e hidróxidos amorfos de aluminio), donde el aluminio forma parte de estructuras cristalinas (haloanita, y caolinita, Figura 3) Estos resultados concuerdan con los reportados por Zysset *et al.*, (1999). Parfitt *et al.* (1984), mencionan que la movilidad del aluminio a través del perfil parece ser importante en la formación de alofana rico en Al y de arcillas interestratificadas, cuando se presentan niveles de Al elevados en el perfil. Bertsch y Bloom (1996) indican que con pH cercanos a la neutralidad, el aluminio precipita como mineral de fase trihidróxido, como la gibsita cristalina o un análogo de pobre ordenamiento, este proceso se presenta en este perfil.

Los valores de oxalato ácido dan una aproximación del grado de acumulación de productos amorfos de reciente alteración. Los materiales extraídos con oxalato ácido tienen influencia sobre algunas de las propiedades del suelo, porcentajes altos de Al_o son asociados con horizontes que presentan una elevada carga dependiente del pH y una alta capacidad de fijación de fósforo (McKeague y Day, 1966); además, la fracción amorfa de los suelos se relaciona con problemas de labranza como son dispersión, floculación, agregación, infiltración, erosión y estabilidad de los terrenos (Jones, 2000; Schaefer *et al.*, 1999)

El Al extraído por oxalato ácido tiende a ser considerado como un representante de oxihidróxidos e hidróxidos de Al, los cuales pueden estar o no asociados con sustancias húmicas y aluminosilicatos amorfos (Paterson *et al.*, 1993). La presencia de bajas cantidades de Al_o en las capas superiores del perfil del suelo, puede obedecer a la mayor acumulación de M.O., lo cual

Profundidad cm	Al_o %	Al_{dcb} %	Al_p %	Al_{cu} %	Alofana %	Imog. %	Al_o/Si_o %	Al_o-Al_p %	Al_p/Al_o	$\text{Al}_p-\text{Al}_{\text{cu}}$	$\text{Al}_{\text{cu}}/\text{Al}_p$	Al total %	Aluminio % extraíble	Saturación Aluminio (%)	Al inter. cmol kg^{-1}	Óxido de Al cristalino %
0 - 10	1.60	2.39	0.93	0.14	2.40	0.00	10.67	0.67	0.58	0.79	0.16	6.71	5.06	1.37	0.30	24.56
10 - 20	2.10	2.58	1.02	0.14	3.43	0.05	4.29	1.09	0.48	0.88	0.13	6.96	5.83	2.22	0.30	16.23
20 - 30	2.58	2.10	0.53	0.10	6.49	0.09	2.78	2.05	0.21	0.43	0.18	8.30	5.30	2.95	0.30	36.34
30 - 40	2.41	1.30	0.34	0.08	7.99	0.00	3.02	2.07	0.14	0.26	0.23	10.52	4.13	6.59	0.70	60.74
40 - 50	2.29	1.44	0.57	0.08	5.71	0.08	2.81	1.73	0.25	0.49	0.14	11.08	4.37	7.44	0.80	60.54
50 - 60	2.50	1.29	0.47	0.07	6.26	0.09	2.80	2.03	0.19	0.39	0.16	11.21	4.33	10.06	1.10	61.40
60 - 70	2.77	1.32	0.32	0.09	9.27	0.00	2.69	2.45	0.12	0.23	0.27	12.09	4.50	13.23	1.30	62.82
70 - 80	3.16	1.39	0.46	0.10	8.82	0.13	2.51	2.71	0.14	0.35	0.22	12.02	5.11	2.04	0.20	57.51
80 - 90	1.82	0.98	0.92	0.08	3.36	0.61	3.25	0.90	0.50	0.84	0.09	12.02	3.79	14.96	1.80	68.44
90 - 100	0.50	0.33	1.55	0.04	0.00	0.5	7.09	0.00	3.13	1.52	0.02	12.01	2.42	29.54	1.30	79.89
100 - 110	0.58	0.36	0.75	0.04	0.00	0.64	6.47	0.00	1.28	0.71	0.05	12.00	1.72	6.40	1.00	85.67
110 - 120	0.18	0.09	0.31	0.02	0.00	0.21	6.00	0.00	1.74	0.29	0.06	11.74	0.60	10.68	0.90	94.91
120 - 130	0.20	0.10	0.11	0.03	0.36	0.00	6.57	0.09	0.57	0.08	0.27	11.55	0.44	17.49	2.30	96.21
130 - 140	0.18	0.09	0.12	0.04	0.21	0.00	5.97	0.06	0.67	0.08	0.30	11.19	0.43	18.00	2.00	96.18
140 - 150	0.17	0.10	0.13	0.04	0.18	0.00	5.80	0.05	0.74	0.09	0.27	10.95	0.44	20.72	2.00	96.02
150 - 160	0.15	0.07	0.13	0.02	0.00	0.00	2.45	0.02	0.88	0.11	0.17	10.72	0.36	17.34	1.70	96.60

Al_o , Aluminio extraído con oxalato ácido; Al_{dcb} , aluminio extraído con citrato ditionito bicarbonato; Al_p , aluminio extraído con pirofosfato de sodio; Al_{cu} , aluminio extraído con cloruro cúprico, imog. = imogolita, alofana (Al_o-Al_p)/ Si_o (Parfitt, 1990)

Tabla II.- Extracción selectiva y relaciones molares

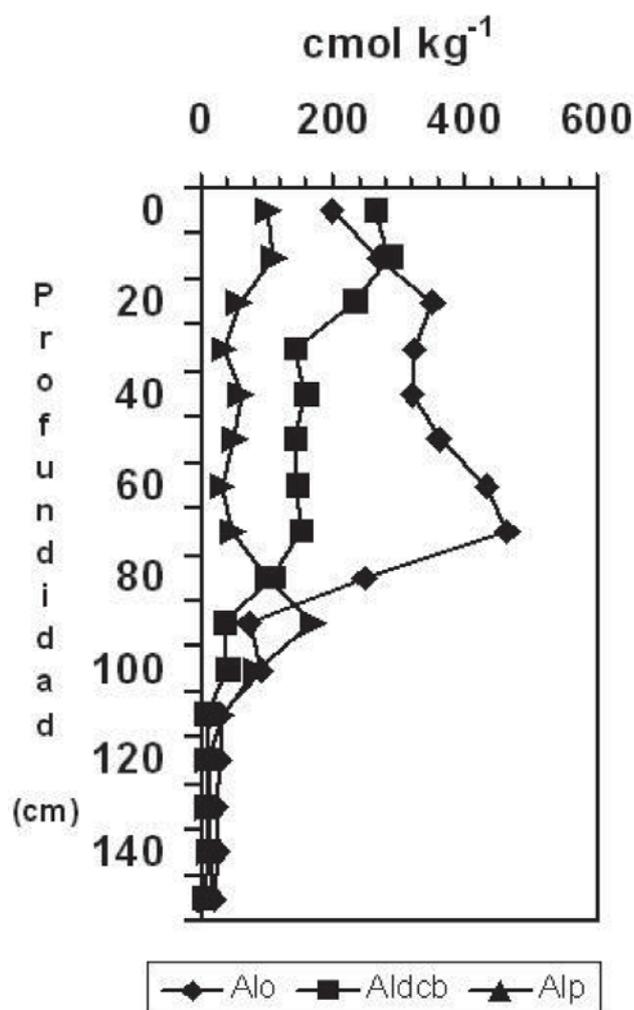


Figura 2. - Distribución de aluminio en el perfil. Al_o, aluminio extraído con oxalato; Al_{dcb}, aluminio extraído con ditionito-citrato-bicarbonato y Al_p, aluminio extraído con pirofosfato.

favorece la formación de complejos metálicos con el humus, como lo demuestran los mayores valores de Al_p y Al_p/Al_o encontrados en estas capas (Tabla 2). La complejación de Al por humus disminuye la actividad del Al y se inhibe la formación de alofana e imogolita (Dahlgren *et al.*, 1993). Las sustancias húmicas en las capas superiores del perfil dificultan la formación de polímeros hidroxialumínicos (Parfitt y Saigusa, 1985).

La extracción selectiva con pirofosfato indica que el Al asociado a la fracción orgánica representa 14% del total de Al presente en el suelo, dentro de los primeros centímetros del perfil, el cual disminuye con la profundidad (Figura 2) con excepción de las capas 80-90 y 90-100 cm. donde se observó un incremento (13 % Al_p en relación con el Al total del suelo), debido a la presencia de un horizonte genético enterrado (Tabla 2) donde el aluminio fue complejado por la fracción orgánica (grupos carboxilos y fenólicos de la materia orgánica). La solubilidad del aluminio en las primeras capas del perfil está controlada por la complejación del Al con la M.O. (De Wit *et al.*, 1999; Zysset *et al.*, 1999).

El aluminio labil en el suelo puede tener una variedad de formas que dependen del pH y la composición mineralógica. El Al en forma labil en el presente perfil representa 37% del Al total del suelo en los primeros 20 cm, éste disminuye con la profundidad, precipitándose como mineral de fase trihidróxido Al(OH)₃ o un análogo de pobre ordenamiento (alofana). El Al labil puede unirse a las cargas negativas de la superficie de las arcillas por fuerzas electrostáticas e intercambiarse con otros cationes, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺; por otro lado, el Al puede estar presente como complejo de componentes hidroxipolinucleares el cual ocupa espacios intersticiales de las arcillas 2:1.

Los bajos porcentajes de alofana que se observan en las capas superficiales del perfil del suelo, se deben al contenido de humus que inhibe la formación de alofana (Dahlgren *et al.*, 1993), lo que indica que el Al que se está liberando por meteorización de los minerales primarios está formando complejos orgánicos y no fracción mineral; sin embargo, la alofana incrementó su porcentaje entre los 30 y 80 cm (Tabla 2) y a profundidades mayores de 90 cm ésta forma parte de estructuras cristalinas.

La extracción de Al por CuCl₂ estima el aluminio monomérico que es complejado o quelatado por M.O. y el aluminio no intercambiable. La presencia de Al_{cu} en las capas superiores del perfil y la capa 70 – 80 puede ser atribuida a polímeros de OH-Al o a formas metastables de hidróxido de Al y oxihidróxidos (Juo y Kamprath, 1979), los bajos contenidos de Al_{cu} en el perfil sugieren escasos contenidos de Al monomérico que fue complejado por la M.O. o que el aluminio está unido y estabilizado por el alto contenido de M.O. (Soon, 1993).

En la Tabla 2 se presenta la relación Al_p/Al_o, se observa la formación de complejos metálicos con el humus, el cual disminuye con la profundidad, sin embargo en la capa 90 – 100 incrementa la relación a 3.13, lo que evidencia la presencia de un horizonte genético sepultado. Las bajas relaciones Al_p/Al_o evidencia que la mayor parte del Al está unido a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos.

La relación Al_p/Al_{dcb} señala una baja asociación del Al con los compuestos orgánicos en las primeras capas del perfil, la escasa afinidad que presenta el Al con la M.O. se debe a la presencia de humus joven con baja capacidad para la formación de complejos (Shoji y Fujiwara, 1984), sin embargo en el horizonte sepultado la relación Al_p/Al_{dcb} son elevadas, lo que indica una asociación del Al con compuestos orgánicos; lo que explica, que en estas capas no se presente alofana (Tabla 2).

Las relaciones Al_{dcb}/Al_t y Al_o/Al_{dcb} son empleadas como índices geoquímicos, en la Tabla 2 se presenta la relación Al_{dcb}/Al_t, ésta varió de 0.36 a 0.01, lo que denota un moderado grado de alteración de minerales primarios que contienen Al. La relación Al_o/Al_{dcb} mayor de 0.7 indica un escaso grado de cristalinidad del Al

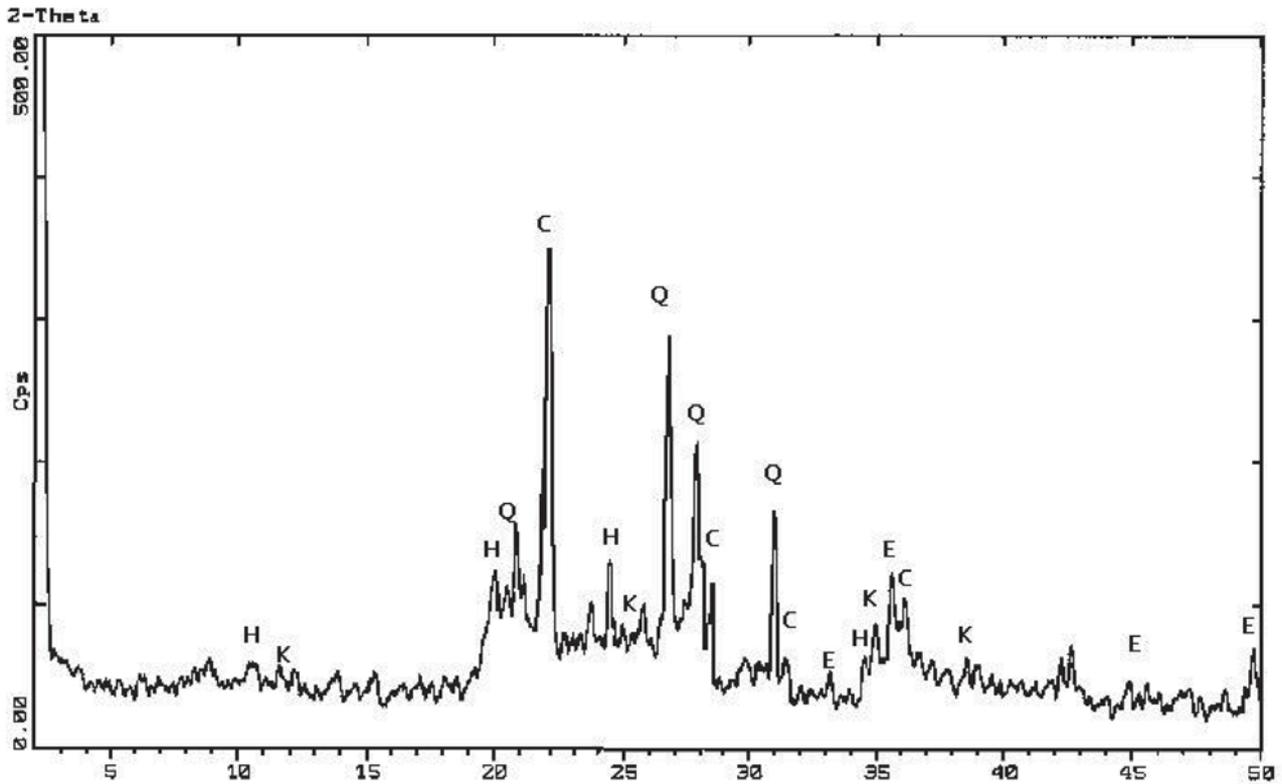


Figura 3.- Diagrama de difracción de rayos X de una fracción fina menor que 2 μm en el Andosol háplico, se indican las principales fases: cristobalita (C); haloisita (H); hematites (E); caolinita (K); cuarzo (Q).

pedogénico presente en el perfil. Dubroeuq *et al.* (1998) mencionan que las condiciones ambientales regulan los contenidos de Si y Al en la solución del suelo, estas condiciones determinan la formación de componentes no cristalinos o minerales de arcilla o de ambos.

Nanzyo *et al.* (1993) mencionan que la relación Al_p/Al_o se puede emplear para separar andisoles alofánicos (relación menor a 0.5) y andisoles no alofánicos (relación mayor a 0.5), en el presente estudio con este planteamiento se divide al perfil en andisol alofánico, los primeros 90 cm, y como andisol no alofánico a una profundidad mayor de 90 cm, lo que prueba la presencia de un horizonte genético sepultado en este perfil y que este último se formó bajo condiciones deficientes de drenaje (Parfitt *et al.*, 1984). Wada (1989) sugiere que las condiciones de drenaje dentro del perfil son importantes en la presencia de haloisita, alofana o imogolita, situación que se presenta en el perfil (Figura, 3).

El contenido de óxidos de Al cristalinos a través del perfil varió de 14 a 96%, lo que señala que la mayor cantidad de Al que se encuentra en las capas inferiores se presenta en minerales primarios y secundarios. La diferencia de $\text{Al}_t - \text{Al}_{\text{deb}}$ refleja el contenido de silicatos primarios y filosilicatos.

Los difractogramas de rayos x de las preparaciones orientadas de la fracción argílica presentan picos a 3.13 Å, 4.04 Å y 2.84 Å, lo que indica la presencia de cristobalita (Figura 3). Las siguientes reflexiones 4.46 Å y 2.59 Å (haloisita), 3.58 Å, 2.56 Å y 2.33 Å

(caolinita) además de la presencia de cuarzo, 3.34 Å y 2.88 Å. Las otras fases cristalinas son hematites 2.69 Å y 2.59 Å y feldespatos alcalinos. La mineralogía básica de estos suelos (haloisita, caolinita, hematites) proponen un grado de meteorización y evolución pedogénica moderada (Acevedo *et al.*, 2002).

Los espectros FT-IR de las arcillas del perfil, en general son espectros propios de alofana, con bandas de absorción entre 2,800 y 3,800 cm^{-1} debido a vibraciones stretching de OH^- con un máximo de 3,440 cm^{-1} , otras entre 1,400-1,800 cm^{-1} debido a la deformación de la molécula de H_2O y, una banda entre 800 y 1,200 cm^{-1} con un máximo alrededor de 1,000 cm^{-1} debido a vibraciones Si-Al-O y parcialmente a vibraciones SiOH y AlOH (Farmer *et al.*, 1979). La presencia de bandas bien definidas a 796, 693, 540 y 471 cm^{-1} que son bandas de vibración de grupos Si-O-Al, indican la presencia de filosilicatos (haloisita, caolinita y nacrita). Los espectros de infrarrojo son de utilidad para detectar minerales caoliníticos y gibsita por las bandas de vibración de valencia de los hidroxilos (Besoain, 1985).

La señal que se presenta alrededor de 1,035 cm^{-1} , se atribuye a las diferencias en el grado de enlace entre la alumina y la sílice en el alofana, esta señal caracteriza las vibraciones stretching de Si-O (Wada, 1987). Parfitt *et al.* (1980) indican que las señales 1,034 y 1,035 cm^{-1} presentan una alta relación molar $\text{H}_2\text{O}(+)/\text{Al}_2\text{O}_3$, revela la existencia de varios defectos o poros, en donde los grupos $\text{Al}(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$ pueden presentarse.

Conclusiones

La distribución vertical y la variación de formas de hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de aluminio en el perfil son indicadores de la alteración de los minerales primarios y de la pedogénesis de este suelo. El aluminio amorfo, como óxido de aluminio, fue la forma con mayor presencia en el perfil. La presencia de alofana se verifica con los espectros de infrarrojo, con bandas de absorción entre 2800 y 3800 cm^{-1} , entre 1400 y 1800 cm^{-1} y una banda entre 800 y 1200 cm^{-1} . La mineralogía básica de estos suelos fue: haloisita, caolinita y hematites, lo que sugiere un grado de meteorización y evolución pedogenética moderada. La relación molar Si/Al (2.1 a 2.5) indica la presencia de minerales de alofana ricos en aluminio. La presencia de Al_{Cu} en las capas superiores del perfil y la capa 70 – 80 se atribuye a polímeros de OH-Al o a formas metastables de hidróxido de Al y oxihidróxidos.

Las sustancias húmicas en las capas superiores del perfil dificultan la formación de polímeros hidroxialumínicos. Los porcentajes bajos de Al_{Cu} en el perfil indican escaso contenido de Al monomérico que fue complejo por la materia orgánica. Las bajas relaciones Al_p/Al_o evidencia que la mayor parte del Al está unida a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos. En el horizonte sepultado, la relación $\text{Al}_p/\text{Al}_{\text{dcb}}$ indica una asociación del Al con compuestos orgánicos. La relación $\text{Al}_p/\text{Al}_{\text{dcb}}$ podría emplearse como un indicador de un horizonte genético sepultado. Los bajos porcentajes de Al en el perfil indican el poco grado de alteración del Al de los minerales primarios y el escaso grado de cristalinidad del Al pedogénico presente en el perfil.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT (proyecto 53235, apoyo complementario a investigadores en proceso de consolidación) y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo el financiamiento otorgado para realizar la presente investigación (PII-UAEH-2004).

Referencias

- Acevedo-Sandoval, O.A., Cruz-Sánchez, M., y Cruz-Chávez, E. (2002): Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia* 36: 401-409.
- Acevedo-Sandoval, O.A., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., Cruz-Chávez, E. (2004): El papel de óxidos de hierro en suelos. *TERA Latinoamericana* (22) 4:485-499.
- Bertsch, P.M. y Bloom, P.R. (1996): Aluminum. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series No. 5 p. 517- 550
- Besoain, E. (1985): Mineralogía de arcillas de suelos. San José Costa Rica. *IICA*. 1216 p.
- Dahlgren, R.A. y Ugolini, F.C. (1991): Distribution and characterization of short range order minerals in Spodosols from the Washington Cascades. *Geoderma* 48: 391-413
- Dahlgren, R.A., Shoji, S., y Nanzyo, M. (1993): Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. 101-144. En: *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. Shoji, S., Nanzyo, M. y Dahlgren, R.A. 1993.. Developments in soil science: 21. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, The Netherlands.
- De Wit, H.A., Kotowski, M., y Mulder, J. (1999): Modeling aluminium and organic matter solubility in the forest floor using WHAM. *Soil Science Society of American Journal*. 63: 1141-1148.
- Dubroeuq, D., Geissert, D., y Quantin, P. (1998): Weathering and soil forming processes under semi-arid conditions in two Mexican volcanic ash soils. *Geoderma* (86): 99-122.
- Emerson, W.W., Foster, R.C. y Oades, J.M. (1986): Organo mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. En: *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. P.M. Huang y Schnitzer, M. (eds.) Special publication 17. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin.
- Enciso-de la Vega, S. (1992): Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 10(1):26-36.
- Farmer, V.C., Fraser, A.R., y Tait, J.M. (1979): Characterization of the chemical structures of natural and synthetic aluminosilicate gels and sols by infrared spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Pergamont Press Ltd. Printed in Great Britam 43: 1417-1420.
- Gensemer, R.W., y Playle, R.C. (1999): The bioavailability and toxicity of Aluminium in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29(4): 315-450.
- Geyne, A.R., Fries, C., Segerstrom, K., Black, R.F., y Wilson, I.F. (1963): Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte distric, state of Hidalgo, Mexico. *Consejo de Recursos Naturales no Renovables*, publication 5E, 222 p.
- Hsu, P.H. (1989): Aluminium hydroxides and oxyhydroxides, p 331-378. In: J.B. Dixon and S.B. Weed (eds) Minerals in Soil Environments. *Soil Science Society of America*, Madison, WI.
- Huang, P.M. 1990. Organo-alumino polymer associations and their significance in soil and environmental sciences. En: *Soil colloids and their associations in aggregates*. De Boodt, M.F., Hayes, M.H.B. y Herbillon, A. (eds.). Plenum Publishing Corporation New York. 179-238.
- Jansen, S., Broadley, M.R., Robbrecht, E., y Smets, E.. (2002): Aluminium hyperaccumulation in angiosperms: A review of its phylogenetic significance. *The Botanical Review* 68(2) 235-269.
- Jones, R.C., Babcock, C.J., y Knowlton, W.B. (2000): Estimation of the total amorphous content of Hawai'i soils by the Rietveld Method. *Soil Science Society of American Journal*. 64: 1100-1108.
- Juo, A.S.R. y Kamprath, E.J. (1979): Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Science Society of American Journal*. 43:35-38.
- Mehra, O.P., y Jackson, M.L.. (1960): Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrato system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
- McKeague, J.A., Cheshire, M.V., Andreux, F., y Berthelin, J. (1986): Organo mineral complexes in relation to pedogenic

- processes. En: *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. P.M. Huang y Schnitzer, M. (eds.) Special publication 17. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, p 549-592.
- McKeague, J.A., y Day, J.H. (1966): Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal Soil Science*. 46: 13-22.
- Nanzyo, M., Dahlgren, R., y Shoji, S. (1993): Chemical characteristics of volcanic ash soils. En: *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. S. Shoji, Nanzyo, M., y Dahlgren, R. (eds.). Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands. p. 145-188.
- Parfitt, R.L. (1990): Allophane in New Zealand a review. *Australian Journal of Soil Research*. 28: 343-360.
- Parfitt, R.L., Saigusa, M., y Cowie, J.D. (1984): Allophane and halloysite formation in a volcanic ash bed under different moisture conditions. *Soil Science* 138(5): 360-364.
- Parfitt, R.L., y Saigusa, M.. (1985): Allophane and humus-aluminum in spodosols and andepts formed from the same volcanic ash beds in New Zealand. *Soil Science* 139(2): 149-155.
- Parfitt, R.L., Furkert, R.J., y Henmi, T. (1980): Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and the tephra. *Clays and Clay Minerals* 28(5): 328-334.
- Paterson, E., Clark, L., y Birnie, A.C. (1993): Sequential selective dissolution of iron, aluminium and silicon from soils. *Communication. Soil Science Plant Anal.* 24(15-16): 2015-2023. Periódico Oficial del Estado de Hidalgo. (2001): Ordenamiento Ecológico Territorial. Estado de Hidalgo. Periódico Oficial (2 de abril de 2001) No. 14. Gobierno del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo. 473 p.
- Schaefer, C.E., Reschutzegger, M., Borges-Junior, M., Simas, F.N.B., y Santos, V. (1999): Extracción secuencial de aluminio en suelos del sur de minas Gerais (Brasil). En: *14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Chile. 8-12 Noviembre. p. 20.
- Shoji, S. y Fujiwara, T. (1984): Active aluminium and iron in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: Their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Science*. 137: 216-226.
- Shoji, S., Nanzyo, M., y Dahlgren, R.A. (1993): Volcanic ash soils. *Genesis, properties and utilization*. Developments in soil science: 21. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, The Netherlands.
- Smith, B.F.L. (1994): Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. En: *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*. M.J. Wilson, (ed.) Chapman and Hall, London. 333-357.
- Soil Survey Staff. (1995): Clave para la taxonomía de suelos, versión 1994. Traducción de: Ortiz-Solorio, C., M.C. Gutierrez-Castorena y J.L. García-Rodríguez. Primera Edición en Español. 1995. Publicación Especial 3. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS)*. Chapingo, México. 306 p.
- Soil Survey Laboratory. (1996): Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42, Ver. 3.0. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Soon, Y.K. (1993). Fractionation of extractable aluminum in acid soils: a review and a proposed procedure. *Communication Soil Science Plant Anal.* 24(13&14): 1683-1708.
- Sosa, D.A. (1994). II Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. INTA. Centro Regional Misiones E.E.A. Cerro Azul p. 68-85.
- Tan, K.H. (1994). Environmental soil science. Ed. Marcel Dekker, INC. New York. USA
- Thomas, G.W., y Hargrove, W.L. (1984): The chemistry of soil acidity. En: *Soil acidity and liming* F. Adam (ed.). Agronomy Monograph No. 9 American Society of Agronomy. Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Wada, S.I. (1987): Imogolite synthesis at 25 °C. *Clays and Clay Minerals* 35: 379-384.
- Wada, K. (1989): Allophane and imogolite. En: *Minerals in soil environments*. J.B. Dixon y Weed, S.B. (Editors). 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI 1051-1087.
- World Reference Base for Soil Resources (WRB). 1998. Report No 84. FAO-ISRIC-IUSS UISS IBU. <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agls/wrb/wrbdocs.htm>
- Zhang, M., Alva, A.K., Li, Y.C., y Calvert, D.V. (1997). Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under Citrus Production. *Soil Science Society of American Journal* 61(3): 794-801.
- Zysset, M., Blaser, P., Luster, J., y Gehring, A.U. (1999): Aluminum solubility control in different horizons of a podsol. *Soil Science Society of American Journal*. 63: 1106-1115.

*Manuscrito recibido el 23 de noviembre de 2007
Aceptado el manuscrito revisado el 14 de agosto de 2008*