

## PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE SUELOS FORESTALES EN ACAXOCHITLAN, HIDALGO, MÉXICO

### Physical, chemical and mineralogical properties of forest soils in Acaxochitlan, state of Hidalgo, Mexico

O Acevedo-Sandoval ✉, MA Valera-Perez, F Prieto-García

(OAS)(MAVP)(FPG) Centro de Investigaciones em Ciencias de La Tierra y Materiales Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Km. 4.5 Carr. Pachuca Tulancingo, Ciudad Universitaria Pachuca, Hidalgo, CP 42184  
acevedo@uaeh.edu.mx

**Artículo recibido:** 14 de diciembre de 2009, **aceptado:** 13 de julio de 2010

**RESUMEN.** El estado de Hidalgo, cuenta con una superficie total de 2'110,573 ha, de éstas el 22 % de los suelos tienen características ácidas, que requieren de evaluarse y determinar sus factores físico-químicos que permitan desarrollar prácticas agronómicas tendientes a mejorar su potencialidad para uso forestal o agrícola. Los objetivos de este estudio fueron a) determinar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos ácidos en el estado de Hidalgo, México, y b) clasificar los suelos de acuerdo al criterio de la IUSS Working Group WRB, 2006. Los suelos estudiados presentan un buen drenaje, de colores que van de 10YR4/3 a 5YR4/4 (Munsell Color Chart), densidad aparente menor de  $1 \text{ Mg m}^{-3}$ , densidad real varía de 1.54 a  $2.15 \text{ Mg m}^{-3}$ ; de textura franco, franco arenosa y arcillosa; pH (en agua 1:2.5) varió de 6.7 a 4.9, ligeramente ácido a muy ácido; CIC alta (promedio de  $30 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ ), materia orgánica mayor del 4 % en los horizontes superiores. En la fracción arcilla está caracterizada por caolinita, haloisita  $7\text{\AA}$ , y óxidos de hierro (goethita). La secuencia de los óxidos lábiles en los horizontes Bt es:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$  lo que indica una etapa de intemperización avanzada de los minerales. Los suelos fueron clasificados como diferentes Alisoles (IUSS Working Group WRB, 2006).

**Palabras clave:** Alisoles, oxihidroxidos de Fe y Al, suelos forestales, mineralogía, México.

**ABSTRACT.** The state of Hidalgo has a total surface of 2'110,573 ha, of which 22 % has characteristically acid soils that need to be evaluated to determine the physico-chemical factors that will allow the development of agricultural practices that will improve their use in forestry or agriculture. The objectives of this study were a) to determine the physical, chemical and mineralogical properties of the acid soils in the state of Hidalgo, Mexico, and b) to classify the soils following the criterium of the IUSS Working Group WRB, 2006. The soils present good drainage, soil colours that vary from 10YR4/3 to 5YR4/4 (Munsell Color Chart), a bulk density lower than  $1 \text{ Mg m}^{-3}$ , a particle density from 1.54 to  $2.15 \text{ MG m}^{-3}$ , soil textures are loam, sandy loam and clay, the pH (in water 1:2.5) varied from 6.7 to 4.9, slightly acid to very acid; a high CEC (average of  $30 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ ), and organic matter geater than 4 % in the surface horizons. The clay fraction is characterised by kaolinite, halloysite  $7\text{\AA}$  and iron oxides (goethite). The sequence of free oxides in the Bt horizons is:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$ , which indicates a stage of advanced mineral weathering. The soils were classified as different Alisols (IUSS Working Group WRB, 2006).

**Key words:** Alisols, Fe and Al oxyhydroxides, forest soils, mineralogy, Mexico.

### INTRODUCCIÓN

Se estima que el 15 % de los suelos de la república mexicana están afectados por procesos de acidificación (SEMARNAP 1999). El estado de Hidalgo, cuenta con una superficie total de 2'110,573

ha, de éstas el 22 % de los suelos tienen características ácidas (Acevedo-Sandoval 2000). El nivel de acidificación de los suelos se ha incrementado en los últimos años como consecuencia de varios factores: pérdida de la capa arable por erosión, extracción de nutrimentos en sistemas de monocultivo intensivo,

efecto residual ácido de fertilizantes nitrogenados amoniacales, deforestación, habilitación para el cultivo de suelos ácidos, manejo inadecuado de prácticas productivas, lixiviación de bases, entre otras (Zetina *et al.* 2002).

La acidificación es un proceso natural, la agricultura, la contaminación y otras actividades humanas aceleran este proceso. La acidez del suelo se presenta por la hidrólisis del CO<sub>2</sub> proveniente de la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos, los grupos ácidos y alcohólicos de la materia orgánica, los grupos OH<sup>-</sup> de la láminas de los aluminosilicatos y los fertilizantes (Zapata 2004).

La acidez por sí misma no constituye un factor limitante para el desarrollo de las plantas, éstas sufren el efecto de la toxicidad del aluminio (Al) cuando la concentración de este catión, en la solución del suelo es mayor de 1 a 2 ppm (Nuñez 1985; Johnson 2002). La presencia del Al en el medio, agua y suelo, puede ocasionar serios riesgos ecológicos (Huang 1990; Tan 1994; Gensemer & 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 traza y tienen además una importante influencia en la sorción y disponibilidad de fosfatos (Zhang *et al.* 1997).

La mayoría de los suelos ácidos son muy evolucionados, pobres en nutrimentos especialmente calcio, magnesio, fósforo, etc. Su caracterización es importante ya que entre ellos ocurren variaciones en cuanto a texturas, grado de acidez, contenido de calcio, magnesio, aluminio del complejo de intercambio, las cuales imposibilitan generalizar prácticas agronómicas tendientes a mejorar su potencialidad para uso forestal, agrícola o pecuario.

El conocimiento y entendimiento de la morfología, clasificación y génesis de suelos ácidos son esenciales, ya que provee las bases para el uso racional y eficiente de este recurso. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos ácidos, y 2) clasificar los suelos de acuerdo a los criterios de la IUSS Working Group WRB (2006).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y características del área de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de Acaxochitlán, estado de Hidalgo, México, los perfiles se localizan entre las coordenadas 20° 10' y 20° 13' de latitud norte y 98° 12' y 98° 15' de longitud oeste, a una altura promedio de 2,300 m. Esta zona se ubica dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana del Cenozoico y ambiente geotectónico de arco continental (Ortega *et al.* 1992). Los perfiles estudiados se encuentran en la Formación Atotonilco El Grande, constituidas por rocas basálticas del periodo terciario, compuestas por fenocristales de olivino (20%), augita (10%), óxidos de Fe-Ti (5%) y andesina (3%), el resto lo constituye la matriz, representada por un intercrecimiento de microfenocristales de andesina y augita (Castro-García & Córdoba 1994; INEGI 1997).

El clima (Cm) es templado húmedo con abundantes lluvias en verano, precipitación anual de 1,200 mm y temperatura media de 15.5°C. (DOEH 2001). El régimen de humedad del suelo es údico y el régimen de temperatura del suelo, mésico (Soil Survey Staff, 1999). En la región de estudio el uso dominante del suelo es forestal, donde la vegetación que predomina es bosque de pino encino compuesto de *Quercus* spp (Perfil 1; 20° 10' 53" LN y 98° 15' 35" LO), *Pinus teocote* (Perfil 2; 20° 13' 45" LN y 98° 12' 35" LO), cultivo de maíz (Perfil 3; 20° 11' 58" LN y 98° 14' 22" LO), *Pinus patula* (Perfil 4; 20° 11' 55" LN y 98° 14' 19" LO), los bosques en general presentan una alta perturbación por actividades antropogénicas, tales como deforestación y cambio de uso de suelo.

### Muestreo de Suelos

La selección de cada perfil se realizó a partir de un estudio previo de fotointerpretación, utilizando fotografías aéreas verticales, pancromáticas, blanco y negro, escala 1: 30,000, y material cartográfico de apoyo (Van Zuidam 1979), esta fase se complementó con recorridos por la zona. Se eligieron cuatro sitios representativos del área y por el tipo de vegetación que predominaba, la toma de muestras

de suelo se llevó a cabo en el mes de noviembre de 2007, al noroeste de la cabecera municipal de Acaxochitlán, estado de Hidalgo, México, a una altitud de 2250.3 m (Perfil 1), 2100 m (Perfil 2), 2335 m (Perfil 3) y 2244 m (Perfil 4), cada perfil se describió morfológicamente (FAO 1990; Schoeneberger *et al.* 2000). De cada capa y horizonte identificado en campo se recolectaron muestras alteradas, éstas se llevaron al laboratorio donde se secaron al aire y tamizaron a través de una malla de 2 mm para sus respectivos análisis físicos y químicos.

### Análisis de Suelos

Los métodos empleados para determinar las propiedades físicas y químicas de cada horizonte se reportan en USDA-NRCS (2004). Las variables analizadas fueron: densidad aparente (método del terrón y parafina), densidad real utilizando picnómetros de 25 ml (Skopp 2000), el espacio poroso se calculo al relacionar la densidad aparente entre la densidad real (Skopp 2000), distribución del tamaño de partículas (método de la pipeta), pH en agua (1:2.5) y en KCl 1N (1:1), materia orgánica (MO) con Walkley y Black, el porcentaje de carbono orgánico se determinó multiplicando  $[6.82 (\% \text{ Alp} - 0.20)]$  (Nanzyo *et al.* 1993), 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, marca Perkin Elmer 3000, modelo Lamda 2S, todos los análisis se realizaron por duplicado.

Los óxidos totales se cuantificaron 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  $2 \mu\text{m}$ , por difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro de rayos X, Phillips modelo X Pert. La extracción de óxidos lábiles de Si, Al y Fe se llevó a cabo empleando el método de Mehra & Jackson (1960). Los óxidos de Si, Al y Fe presentes en la disolución se determinaron mediante espectrometría de emisión en plasma de inducción acoplado (ICP).

Para establecer la pérdida o ganancia de óxidos totales se aplicó la constante (K) de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Krauskopf 1979), comparando el horizonte

más profundo con los horizontes meteorizados.

## RESULTADOS

### Propiedades Físicas

Los horizontes superficiales se caracterizan por presentar colores pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) a pardo rojizo (5YR4/3) en seco, y pardo amarillento oscuro (10YR3/4) a pardo rojizo oscuro (5YR2.5/2) en húmedo, de consistencia friable en húmedo, y estructura granular a bloques subangulares de tamaño fino a granular (Tabla 1).

Los perfiles estudiados en general presentan un buen drenaje, las texturas que dominan son franco, franco arenosa y arcillosa (Tabla 2). El Perfil 3 presenta un horizonte A truncado, debido al cambio de uso del suelo, forestal a agrícola, que da como consecuencia la pérdida parcial del horizonte A por erosión hídrica. Todos los perfiles presentan un incremento de arcilla con la profundidad (30 a 50 % de arcilla), el horizonte Bt; se caracteriza por la presencia de películas de arcilla en las paredes de los poros y en la superficie de los agregados, mismas que son producto de la acción de los factores de formación del suelo y de la ocurrencia combinada de los procesos dominantes de: a) acumulación y redistribución de arcilla, y b) desilificación y concentración de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio (Chadwick & Graham 2000).

### Propiedades Químicas

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio obtenidos para algunas propiedades químicas de los cuatro perfiles.

El pH (1:2.5 en agua) varió de 6.7 a 4.9, de ligeramente ácido a muy ácido, con una ligera disminución de acidez al aumentar la profundidad en el Perfil 2, en los otros tres perfiles se presenta un incremento de la acidez con relación a la profundidad del suelo.

En relación a las bases intercambiables el calcio, magnesio y potasio presentan valores bajos a muy bajos en los Perfiles 2, 3 y 4, estos valores pueden ser considerados como un nivel crítico debido a las altas precipitaciones y a la pendiente del terreno. El Perfil 1 muestra contenidos altos de cationes in-

**Tabla 1.** Caracterización morfológica de los perfiles estudiados.  
**Table 1.** Morphological characterisation of the studied profiles.

Profundidad cm	Horizonte	Estructura	Consistencia en húmedo	Transición
<b>Perfil 1</b>				
0 - 9	A1	Granular mediana con bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y abrupta
9 - 37	A2	Bloques subangulares medianos.	Friable	Ondulada y abrupta
37 - 50	Bt	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y gradual
> 50	C	Bloques subangulares medianos	Firme	—
<b>Perfil 2</b>				
0 - 12	A1	Granular fina	Friable	Horizontal y clara
12 - 22	A2	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y clara
22 - 38	A3	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y difusa
38 - 69	A4	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y difusa
69 - 100	Bt1	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
> 100	Bt2	Bloques subangulares medianos	Firme	—
<b>Perfil 3</b>				
0 - 9	A	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Horizontal y gradual
9 - 22	Bt1	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
22 - 30	2Bt2	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
30 - 50	2Bt3	Bloques subangulares medianos	Firme	Horizontal y difusa
50 - 66	2BC	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Horizontal y difusa
> 66	2C	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	—
<b>Perfil 4</b>				
0 - 8	A1	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y difusa
8 - 17	A2	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y gradual
17 - 64	Bt1	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Ondulada y difusa
64 - 86	Bt2	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Ondulada y difusa
> 86	Bt3	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	—

tercambiables debido a los procesos de mineralización de la materia orgánica compuesta de hojas de encino (Tabla 3). El porcentaje de saturación de bases es mayor del 50 % en el Perfil 1 y la tendencia fue disminuir con la profundidad del suelo, mientras que, en los Perfiles 2, 3 y 4 es menor del 20 %, incrementándose éstas con relación a la profundidad

del suelo, lo cual indica un grado de saturación o eliminación de bases por lixiviación y lavado del suelo.

#### Óxidos Lábilés

La Tabla 4 presenta los resultados de los óxidos lábilés. En general el aluminio y silicio decrecen

con la profundidad del suelo, lo que indica que parte de éstos, se polimeriza y acompleja para formar estructuras cristalinas, arcillas (caolinita, haloisita) en los horizontes Bt, y el contenido de hierro lábil en general aumenta, respecto de la profundidad teniendo su máximo en un horizonte Bt.

### Óxidos totales, ganancias y pérdidas

Las Tablas 5 y 6 muestran los contenidos de óxidos totales, las pérdidas y ganancias resultantes de los horizontes estudiados. Los contenidos de SiO<sub>2</sub> indican que son materiales de naturaleza máfica (basáltica).

### Mineralogía

En la fracción fina se identificó caolinita, haloisita 7Å, óxidos de hierro (goethita), cuarzo y albita.

### Génesis de los suelos

El área de estudio pertenece a la Formación Atotonilco El Grande, constituida por rocas basálticas del periodo terciario, los suelos se formaron a partir de estos materiales los cuales estuvieron sujetos a procesos de intemperización agresiva, dada por la presencia de arcilla, el color, y óxidos lábiles

Tabla 2. Análisis físicos de los perfiles 1, 2, 3 y 4.  
Table 2. Physical analyses of profiles 1, 2, 3 and 4.

Profundidad cm	Horizonte	Color		Densidad Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	Textura %			Clase textural
		Seco	Húmedo	Aparente	Real		Arena	Limo	Arcilla	
<b>Perfil 1</b>										
0 - 9	A1	10YR4/4 Pardo amarillo oscuro	10YR3/4 Pardo amarillo oscuro	1.1	2.06	46.60	36	42	22	Franco
09/37	A2	2.5Y5/3 Pardo olivo claro	2.5Y3/3 Pardo olivo os- curo	1.09	2.02	46.04	48	28	24	Franco arcillo areno- so
37 - 50	Bt	10YR4/3 Pardo	10YR4/6 Pardo amarillo oscuro	1.06	2.14	50.47	30	30	40	Arcilloso
> 50	C	2.5Y7/3 Amarillo pálido	2.5Y6/8 Amarillo olivo	0.89	1.82	51.10	74	16	10	Franco arenoso
<b>Perfil 2</b>										
0 - 12	A1	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR2/1 Negro	0.63	1.54	59.09	54	42	4	Franco arenoso
12/22	A2	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR2/1 Negro	0.67	1.61	58.39	60	34	6	Franco arenoso
22 - 38	A3	10YR4/3 Pardo	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	0.80	1.82	56.04	68	26	6	Franco arenoso
38 - 69	A4	10YR4/2 Pardo grisáceo oscuro	10YR2/2 Pardo muy os- curo	0.83	2.01	58.71	74	18	8	Franco arenoso
69 - 100	Bt1	10YR5/3 Pardo	10YR3/4 Pardo amarillo oscuro	0.92	2.15	57.21	36	16	48	Arcilla
> 100	Bt2	10YR5/4 Pardo amari- lento	10YR3/4 Pardo amari- lento osc.	0.95	2.30	58.70	38	30	32	Arcilloso

Tabla 2. Continuación.  
Table 2. Continued.

Profundidad cm	Horizonte	Color		Densidad Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad %	Textura %			Clase textural
		Seco	Húmedo	Aparente	Real		Arena	Limo	Arcilla	
<b>Perfil 3</b>										
0 - 9	A	5YR4/3 Pardo rojizo	5YR2.5/2 Pardo oscuro rojizo	0.78	1.8	56.67	34	44	22	Franco
09/22	Bt1	2.5YR4/3 Pardo rojizo	2.5YR2.5/2 Pardo oscuro rojizo	0.86	1.87	54.01	28	42	30	Arcilloso
22 - 30	2Bt2	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo oscuro rojizo	0.95	1.89	49.74	28	46	26	Franco
30 - 50	2Bt3	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo oscuro rojizo	0.89	1.91	53.4	30	46	24	Franco
50 - 66	2BC	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/4 Pardo oscuro rojizo	0.89	1.86	52.15	38	44	18	Franco
> 66	2C	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/2 Pardo oscuro rojizo	0.79	1.64	51.83	68	22	10	Franco arenoso
<b>Perfil 4</b>										
0 - 8	A1	5YR4/3 Pardo rojizo	5YR2.5/2 Pardo rojizo oscuro	0.76	1.79	57.54	26	42	32	Arcilloso
08/17	A2	2.5YR4/3 Pardo rojizo	2.5YR2.5/2 Rojo muy os- curo	0.88	1.92	54.17	24	36	40	Arcilloso
17 - 64	Bt1	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo rojizo oscuro	0.86	1.9	54.74	22	28	50	Arcilla
64 - 86	Bt2	7.5YR4/4 Pardo	7.5YR3/3 Pardo oscuro	0.91	1.88	51.6	24	28	48	Arcilla
> 86	Bt3	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/4 Pardo rojizo oscuro	0.88	2.09	57.89	24	26	50	Arcilla

de hierro y aluminio.

### Clasificación de los suelos

Los suelos ácidos se clasificaron con base en los criterios propuestos por la IUSS Working Group WRB 2006. El Perfil 1: Alisol Cutánico (Epieútrico), Perfil 2: Alisol Cutánico Úmbrico (Hiperdístico, Endocláyico), Perfil 3: Alisol Cutánico Úmbrico (Hiperdístico), Perfil 4: Alisol Cutánico, Úmbrico (Hiperdístico, Cláyico). Los Alisoles son suelos que se caracterizan por presentar un horizonte árgico como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente

por migración de arcillas) con una CIC igual o mayor del 24 cmol<sup>+</sup>kg<sup>-1</sup> de arcilla (en todo el horizonte árgico o en sus primeros 50 cm) y una saturación de bases menor a 50% en la mayor parte entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo (IUSS Working Group WRB 2006).

### DISCUSIÓN

Marshall (1977) menciona que la acumulación de arcilla que se presenta en los suelos, es producto de la importante lixiviación que tiene lugar durante

**Tabla 3.** Análisis químicos de los perfiles 1, 2, 3 y 4.  
**Table 3.** Chemical analyses of profiles 1, 2, 3 and 4.

Profundidad cm	Horizonte	pH H <sub>2</sub> O	1:2.5 KCl	ΔpH	M.O. %	C %	C.I.C. cmol(+)kg <sup>-1</sup>	Bases intercambiables cmol(+) kg <sup>-1</sup>			Saturación de bases %	
								Na	K	Ca		
<b>Perfil 1</b>												
0 - 9		6.25	4.53	-1.72	3.82	2.22	41.40	1.31	2.06	16.84	3.09	56.28
09/37		6.62	5.61	-1.01	1.36	0.79	36.80	0.68	1.14	19.49	3.83	68.32
37 - 50		6.70	4.90	-1.80	2.10	1.22	36.20	1.34	1.14	12.55	2.30	47.87
> 50		5.52	4.23	-1.29	0.13	0.08	42.80	0.83	0.20	0.27	0.09	3.25
<b>Perfil 2</b>												
0 - 12		4.94	4.10	-0.84	16.21	9.40	17.60	0.93	0.17	0.30	0.08	8.41
12/22		5.13	4.27	-0.86	15.53	9.01	23.60	1.08	0.24	0.37	0.11	7.63
22 - 38		5.13	4.19	-0.94	6.90	4.00	17.00	1.07	0.47	0.39	0.10	11.94
38 - 69		5.20	4.43	-0.77	6.78	3.93	17.60	1.02	0.34	0.40	0.10	10.57
69 - 100		5.18	4.15	-1.03	3.21	1.86	11.60	0.86	0.21	0.44	0.11	13.97
> 100		5.15	4.24	-0.91	2.80	1.62	8.80	0.73	0.17	0.30	0.11	14.89
<b>Perfil 3</b>												
0 - 9		5.48	4.46	-1.02	10.37	6.02	31.40	0.45	2.46	2.03	0.66	17.83
09/22		5.49	4.48	-1.01	6.18	3.58	20.00	0.32	0.73	1.25	0.39	13.45
22 - 30		5.48	4.47	-1.01	6.18	3.58	24.40	0.30	0.85	1.27	0.33	11.27
30 - 50		5.20	4.25	-0.95	2.68	1.55	25.20	0.28	0.82	1.31	0.36	10.99
50 - 66		5.16	4.24	-0.92	0.47	0.27	27.28	0.27	0.92	1.36	0.51	11.22
> 66		5.18	4.23	-0.95	0.70	0.41	28.00	0.23	0.90	1.38	0.50	10.75
<b>Perfil 4</b>												
0 - 8		6.29	4.78	-1.51	13.17	7.64	44.00	0.35	0.65	2.31	1.05	9.91
08/17		5.95	4.50	-1.45	6.06	3.52	26.00	0.23	0.45	1.40	0.83	11.19
17 - 64		5.98	4.62	-1.36	0.47	0.27	17.00	0.21	0.13	1.03	0.97	13.76
64 - 86		6.15	4.58	-1.57	0.47	0.27	25.00	0.27	0.14	0.88	0.93	8.88
> 86		6.00	4.55	-1.45	0.12	0.07	25.20	0.27	0.12	0.87	0.96	8.81

la mayor parte del año y es también evidente por las películas o revestimientos que caracterizan al horizonte Bt el cual puede extenderse hasta grandes profundidades.

En los horizontes superficiales de los cuatro perfiles la densidad aparente oscila de 1.1 a 0.63 Mg m<sup>-3</sup> (Tabla 2), ésta se incrementa con la profundidad con excepción del Perfil 1 que se reduce debido a que se trata de un material pumítico de naturaleza máfica (Dahlgren *et al.* 1993). West *et al.* (2004) reportan que suelos que presentan una densidad aparente baja, permeabilidad alta y resistencia a la erosión bajo condiciones de precipitación elevada, es propia de suelos que contienen frecuentemente halosita y óxidos de hierro, situación que prevalece en estos suelos. La densidad real varió de 1.54 a 2.30 Mg m<sup>-3</sup> tiende a aumentar con la profundidad del suelo en los Perfiles 2, 3 y 4, lo que indica la presencia de materiales menos intemper-

zados.

La densidad real es congruente con la naturaleza del material parental, por lo que esos valores indicaron dominancia de minerales ligeros en todas sus fracciones. Las características anteriores proporcionan a los suelos un medio físico adecuado para el desarrollo de las especies forestales al presentar buena aireación, buen drenaje y adecuada porosidad.

Los resultados de la Tabla 3 indican que el Perfil 2 tiene un alto contenido de materia orgánica en el horizonte superficial. Los Perfiles 3 y 4 se consideran medio y muy bajo para el Perfil 1. El porcentaje de materia orgánica decrece con la profundidad del suelo hasta llegar a valores considerados como muy pobres (Aguilar-Santelises 1988). Los menores porcentajes de C en el Perfil 1 podría deberse a que en el pasado éstos tuvieron un uso agrícola intenso y fueron abandonados debido a la degradación y, con el tiempo, esas áreas se convirtieron en bos-

**Tabla 4.** Óxidos lábiles de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) y sus relaciones molares en los perfiles.  
**Table 4.** SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> free oxides (%) and their molar relationships in the profiles.

Profundidad	Al	Fe	Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Perfil 1</b>									
0 - 9	0.13	1.15	0.17	0.25	1.64	0.36	2.5	0.58	0.19
01/09/37	0.139	1.29	0.1	0.26	1.84	0.21	1.33	0.3	0.1
37 - 50	0.173	1.5	0.27	0.33	2.14	0.57	2.95	0.71	0.23
> 50	0.08	0.34	0.22	0.15	0.49	0.47	5.28	2.57	0.74
<b>Perfil 2</b>									
0 - 12	2.91	2.14	0.95	5.5	3.06	2.03	0.63	1.77	0.24
01/12/22	3.11	2.78	1.04	5.87	3.97	2.22	0.64	1.49	0.23
22 - 38	1.99	2.85	0.53	3.76	4.07	1.13	0.51	0.74	0.14
38 - 69	2.02	3.01	0.51	3.82	4.3	1.09	0.49	0.67	0.13
69 - 100	1.01	3.84	0.07	1.91	5.49	0.15	0.13	0.07	0.02
> 100	0.52	2.96	0.05	0.98	4.23	0.11	0.18	0.07	0.02
<b>Perfil 3</b>									
0 - 9	0.65	2.03	0.18	1.23	2.9	0.39	0.53	0.35	0.09
01/09/22	0.78	2.8	0.18	1.47	4	0.39	0.44	0.26	0.07
22 - 30	0.83	2.73	0.18	1.57	3.9	0.39	0.42	0.26	0.07
30 - 50	0.47	2.67	0.12	0.89	3.82	0.26	0.49	0.18	0.05
50 - 66	0.24	2.3	0.142	0.45	3.29	0.3	1.14	0.25	0.08
> 66	0.21	2	0.18	0.4	2.86	0.39	1.65	0.36	0.12
<b>Perfil 4</b>									
0 - 8	0.43	2.42	0.12	0.81	3.46	0.26	0.54	0.2	0.06
01/08/17	0.5	3.4	0.11	0.94	4.86	0.24	0.42	0.13	0.04
17 - 64	0.45	3.67	0.15	0.85	5.25	0.32	0.64	0.16	0.05
64 - 86	0.31	3.12	0.11	0.59	4.46	0.24	0.68	0.14	0.05
> 86	0.39	3.69	0.14	0.74	5.28	0.3	0.69	0.15	0.05

ques secundarios con lento crecimiento. Los suelos forestales (Perfil 2 y 4) y el suelo cultivado (Perfil 3) presentan un horizonte úmbrico debido al contenido de materia orgánica, el suelo del Perfil 3 se incorporó recientemente a la agricultura (hace 3 años).

Los resultados de pH coinciden con lo reportado por Porta *et al.* (1999). Lilienfein *et al.* (2000) y Brady & Weil (1999) quienes mencionan que las coníferas incrementan la acidez del suelo y, asociada con ésta, se alteran procesos edáficos, al aumentar la hidrólisis ácida, la lixiviación de cationes básicos y la actividad fúngica, y disminuir la nitrificación.

Los suelos con altos contenidos de materia orgánica pueden tener a la vez una mayor CIC y pH's bajos, debido a que la materia orgánica contiene una gran cantidad de grupos carboxilos (R-COOH) lo cual resulta de una alta densidad de sitios ionizados y la liberación de H<sup>+</sup> y por consecuencia pH's ácidos (Johnson 2002). Zapata (2004) menciona que la acidez incide directamente en la fertilidad de los

suelos, ocasionando un cambio en la solubilidad de los elementos nutrimentales para las plantas y afectando de este modo la producción agrícola y forestal. El ΔpH varió de -0.77 a -1.80 lo que indica que los suelos estudiados presentan carga negativa neta permanente (Uehara & Gillman 1981).

El mayor porcentaje de bases en el Perfil 1 se debe posiblemente al tipo de vegetación presente (*Quercus* spp) ya que el proceso de descomposición de las hojas de los árboles caducifolios causada por lombrices, bacterias y las condiciones climáticas, por lo general es mas rápida y puede efectuarse en el curso de un año a diferencia de las coníferas que tardan de siete a diez años (Fitzpatrick 1978), liberándose los compuestos minerales de la materia orgánica, acumulándose en los horizontes superficiales.

La capacidad de intercambio catiónico en general se puede considerar alta (promedio de 30 cmol<sup>+</sup>kg<sup>-1</sup>), lo que se atribuye, en gran parte, a la presencia de sesquióxidos (Johnson 2002), al con-

**Tabla 5.** Óxidos totales (%), pérdidas y ganancias de los perfiles 1 y 2.  
**Table 5.** Profiles 1 and 2: total oxides (%), losses and gains.

		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Perfil 1										
0 - 9	A1	50.50	2.14	19.49	10.56	0.19	1.19	1.47	0.83	0.85
01/09/37	A2	51.66	2.12	19.22	10.56	0.12	1.21	1.61	0.94	0.89
37 - 50	Bt1	48.61	2.30	21.00	12.24	0.22	1.17	1.08	0.50	0.57
> 50	C	46.61	1.86	23.88	10.11	0.05	1.33	1.26	0.21	0.24
Pérdidas o ganancias										
	A1	15.26	0.76	0.00	1.90	0.17	0.02	0.41	0.73	0.73
	A2	17.58	0.77	0.00	1.90	0.09	0.05	0.57	0.86	0.77
	Bt1	8.67	0.76	0.00	3.81	0.20	0.00	-0.03	0.36	0.41
Perfil 2										
0 - 12	A1	26.76	1.30	19.94	11.69	0.09	0.45	0.32	0.31	0.27
01/12/22	A2	26.10	3.00	21.70	13.00	0.16	0.27	0.31	0.11	0.28
22 - 38	A3	31.24	1.84	29.60	11.36	0.05	0.43	0.12	0.10	0.19
38 - 69	A4	31.23	1.94	29.91	11.96	0.04	0.38	0.09	0.13	0.21
69 - 100	Bt1	36.24	2.16	33.48	12.26	0.05	0.28	0.02	0.01	0.10
> 100	Bt2	37.03	2.15	33.86	12.59	0.04	0.31	0.02	0.03	0.07
Pérdidas o ganancias										
	A1	8.41	0.06	0.00	7.26	0.11	0.45	0.52	0.50	0.39
	A2	3.70	2.53	0.00	7.69	0.21	0.11	0.46	0.14	0.37
	A3	-1.29	-0.05	0.00	0.40	0.02	0.18	0.12	0.08	0.15
	A4	-1.68	0.05	0.00	0.95	0.01	0.12	0.08	0.12	0.17
	Bt1	-0.38	0.03	0.00	-0.19	0.01	-0.03	0.00	-0.02	0.03

tenido de materia orgánica y a cantidad y naturaleza de las arcillas (Dixon 2000). Takahashi *et al.* (2001) mencionan que al presentarse un desorden en la estructura cristalina de la haloisita, puede ser responsable de una mayor área superficial y de la capacidad de intercambio catiónico. Johnson *et al.* (2000) reportan que en suelos forestales de Nueva Inglaterra y del noreste de USA (Johnson 2002) la materia orgánica es la fuente predominante de sitios de intercambio, lo que muestra el alto grado de transformación y evolución de la materia orgánica de esos suelos.

Meyer & Arp (1994) reportan que en suelos forestales ácidos, al determinar la capacidad de intercambio catiónico con NH<sub>4</sub>OAc 1N (pH 7.0) tiende a sobrevalorar los resultados, situación que prevaleció en el presente trabajo debido a la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos con carga variable. Li *et al.* (1998) concluyen que la capacidad de intercambio catiónico de suelos forestales de Taiwán es influenciada primeramente por la cantidad de materia orgánica, los minerales de rango corto y los contenidos de arcilla en el suelo. La fertilidad potencial

de los suelos estudiados es moderada, debido principalmente a la limitada presencia de cationes básicos intercambiables.

La relación molar de los óxidos lábiles SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestra la desilificación que se presenta en el perfil de intemperismo. La relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en el Perfil 1 es significativa desde el punto de vista de alteración, solo en los primeros 50 cm, donde las relaciones oscilan de 1.33 - 2.95 y manifiestan procesos de transformación a minerales 1:1, se corrobora con la relación SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> donde inciden de forma directa los factores pedogenéticos como el clima y el material parental de la región. Por debajo de esta profundidad se tienen valores altos que sugieren una alteración relativa de los minerales primarios (Tabla 4).

Las relaciones moleculares SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de los Perfiles 2, 3 y 4 menores de 1.65 indican un mayor grado de alteración de los minerales primarios y secundarios por procesos geoquímicos y pedogenéticos. La secuencia de los óxidos lábiles que se presentan en los horizontes Bt es: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > SiO<sub>2</sub> lo que indica una etapa de intemperización

avanzada de los minerales (Chesworth 1977), debido a las condiciones climáticas que prevalecen en la zona de estudio, la naturaleza básica del material geológico y el tiempo en que se han desarrollado.

En los horizontes superficiales de los cuatro perfiles, la cantidad determinada de  $\text{SiO}_2$  fue elevada en comparación con el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (sólo perfil 1) además de trazas de óxidos de Ti, K, Na, Ca, Mg y Mn, los últimos atribuibles a la alteración de materiales ferromagnesianos y feldespatos (Elsass et al. 2000). Las relaciones molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  (no se reportan) en todos los perfiles se manifiestan valores bajos, lo que representa un nivel de intemperización alta. La relación  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  con cocientes bajos, apoyan lo anterior. Tan & Troth (1982) reportan que al disminuir la relación  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  y  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  con la profundidad en el perfil, indica la traslocación de Al y Fe junto con la translocación de arcilla.

Dixon (2000) reportó que la caolinita es un material ubicuo y es especialmente abundante en suelos ácidos. La extracción de sílice (desilificación) de los minerales primarios y secundarios fue promovida por la acidez del suelo y también de la edad del suelo. La caolinita es el resultado de la desilificación de los minerales primarios, por lo que su presencia puede atribuirse al bajo pH del suelo. El hierro como goethita (óxido de hierro cristalino), su presencia depende de una buena aireación, una temperatura y humedad que varían con las estaciones del año, además de un alto potencial redox en el suelo (Acevedo-Sandoval et al. 2004; Smith 1994).

La acidificación del suelo es un proceso espontáneo que se da durante la pedogénesis, durante ella ocurre una continua intemperización química, la cual consiste en una pérdida de cationes alcalinos y alcalinoterreos ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) e incremento concomitante de cationes metálicos ( $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+4}$ ) que pueden sufrir hidrólisis ácida (Zapata 2004).

En la génesis de estos suelos han jugado un papel importante los siguientes factores: 1) la geología de la región dada por rocas basálticas, 2) las condiciones climáticas que promueven el lavado de bases y el drenaje del perfil 3) formación de hori-

zontes de iluviación con altos contenidos de arcilla y revestimientos arcillosos, óxidos de hierro, y reducción de la porosidad con la profundidad, 4) elevados contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales y 5) la edad del suelo.

En el perfil 1, se presentaron procesos de eluviación que se expresan por una textura más gruesa en los horizontes superficiales; la materia orgánica también presenta un comportamiento similar, pero estas propiedades no son suficientes para caracterizarlos como horizontes álbicos.

De todo este estudio se puede concluir que los suelos se formaron a partir del intemperismo de rocas basálticas en clima húmedo por lo que los suelos son profundos, tienden a la acidez, son ricos en materia orgánica, elevada CIC, desbasificación, y un aumento en el contenido de arcilla en el subsuelo con respecto al horizonte suprayacente debido a los procesos pedogenéticos (especialmente por migración de arcillas) resultado de una compleja interacción del clima, el relieve, tipo de vegetación, contenido de materia orgánica, la dinámica del agua y la edad.

El material parental, la vegetación, la materia orgánica y el clima son los cuatro factores que influyen sobre la química y la mineralogía de los suelos ácidos.

Las pérdidas y ganancias de óxidos totales manifiestan la intemperización alta a que estuvieron sujetos estos suelos.

La secuencia de los óxidos lábiles que se presentan en los horizontes Bt es:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$  lo que indica una etapa de intemperización avanzada de los minerales. La mineralogía de la fracción arcilla indica la presencia de caolinita y halosita. Los suelos se clasificaron como Alisoles (IUSS Working Group WRB, 2006).

## 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).

**Tabla 6.** Óxidos totales (%), pérdidas y ganancias de los perfiles 3 y 4.  
**Table 6.** Profiles 3 and 4: total oxides (%), losses and gains.

		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Perfil 3										
0 - 9	A1	36.52	2.09	21.26	12.17	0.46	0.62	1.13	0.41	0.43
01/09/22	Bt	40.73	2.23	23.68	12.29	0.50	0.60	1.01	0.47	0.31
22 - 30	2Bt2	40.00	2.26	23.78	13.19	0.55	0.55	1.02	0.48	0.34
30 - 50	2Bt3	42.40	2.38	25.58	13.53	0.42	0.55	0.89	0.46	0.35
50 - 66	2BC	39.07	2.47	24.13	14.86	0.27	0.86	0.97	0.40	0.42
> 66	2C	43.38	2.23	26.50	13.48	0.23	1.07	0.88	0.63	0.60
Pérdidas o ganancias										
	A1	2.14	0.38	0.00	1.69	0.34	-0.30	0.53	-0.12	-0.06
	Bt	2.20	0.27	0.00	0.27	0.33	-0.40	0.25	-0.10	-0.25
	2Bt2	1.20	0.29	0.00	1.22	0.38	-0.46	0.26	-0.10	-0.22
	2Bt3	0.54	0.24	0.00	0.54	0.21	-0.50	0.04	-0.15	-0.24
	2BC	-0.47	0.48	0.00	2.84	0.07	-0.13	0.19	-0.19	-0.14
Perfil 4										
0 - 8	A1	36.67	2.53	22.16	14.17	0.58	0.69	0.68	0.31	0.28
01/08/17	A2	39.08	2.72	26.08	14.91	0.43	0.73	0.44	0.20	0.20
17 - 64	Bt1	39.73	2.65	27.97	15.16	0.25	0.72	0.29	0.07	0.12
64 - 86	Bt2	39.96	2.42	28.97	14.48	0.16	0.73	0.23	0.08	0.10
> 86	Bt3	39.82	2.24	29.32	13.78	0.14	0.69	0.20	0.05	0.09
Pérdidas o ganancias										
	A1	8.70	1.11	0.00	4.97	0.63	0.22	0.70	0.36	0.28
	A2	4.12	0.82	0.00	2.98	0.34	0.13	0.29	0.17	0.13
	Bt1	1.83	0.54	0.00	2.11	0.12	0.06	0.10	0.02	0.04
	Bt2	0.62	0.21	0.00	0.87	0.02	0.05	0.03	0.03	0.01

## LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval OA, Ortíz-Hernández E, Cruz-Sánchez M, Cruz-Chávez E (2004) El papel de óxidos de hierro en suelos. *TERRA Latinoamericana* 22(4): 485-497.
- Acevedo-Sandoval OA (2000) Degradación y contaminación de los suelos del estado de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. México 62 pp.
- Aguilar-Santelises A (1988) Métodos de análisis de suelos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, México 88 pp.
- Brady CN, Weil RR (1999) The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Castro-García A, Córdoba DA (1994) Estratigrafía del área volcánica de Tulancingo, Hidalgo, México. *Pan-cromo* 23, Revista de Investigación. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 26-39.
- Chadwick OA, Graham RC (2000) Pedogenic processes p. E41-E75. *In*. Sumner, M.E. (Ed in Chief) Handbook of soil science. CRC Press USA
- Chesworth W (1977) Weathering stages of the common igneous rocks, index minerals and mineral assemblages at the surface of the earth: *The Journal of Soil Science* 28: 490-497.
- Dahlgren R, Shoji S, Nanzyo M (1993) Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. *In*. S. Shoji, M. Nanzyo and R.A. Dahlgren (Ed) Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization. Elsevier Science Publishers B.V. The Netherlands. p 101-143.

- DOEH (2001) Ordenamiento Ecológico Territorial. Diario Oficial del Estado de Hidalgo Estado de Hidalgo. Periódico Oficial (2 de abril de 2001) No. 14. Gobierno del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo. 473 pp.
- Dixon JB (2000) Functional roles of soil minerals. In R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta, N.E. García-Calderón (Eds.) 2000. La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I Colegio de Postgraduados en Ciencias agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo, México 434 pp.
- Elsass F, Dubroeuq D, Thiry M (2000) Diagenesis of silica minerals from clay minerals in volcanic soils of Mexico. *Clay Minerals* 35: 477-489.
- FAO (1990) Guidelines for soil profile description. Third edition (revised). Soil Resources Management and Conservation Service. Land and Water Development Division. Rome, Italy.
- Fitzpatrick EA (1978) Introducción a la ciencia del suelo. Primera edición en español. Publicaciones Cultural, S.A. México, 197 pp.
- Gensemer RW, Playle RC (1999) The bioavailability and toxicity of Aluminium in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29(4): 315-450.
- Huang PM (1990) Organo-alumino polymer associations and their significance in soil and environmental sciences. In M.F. De Boodt, M.H.B. Hayes, and A. Herbillon (eds.) *Soil colloids and their associations in aggregates*. Plenum Publishing Corporation New York. 179-238.
- INEGI (1997) Acaxochitlán, Estado de Hidalgo. Cuaderno Estadístico Municipal. Edición 1996. Aguascalientes, México. 111 pp.
- IUSS Working Group WRB (2006) World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd. edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO. Rome, Italy.
- Johnson CE, Ruiz-Mendez JJ, Lawrence GB (2000) Forest soil chemistry and terrain attributes in a Catskills watershed. *Soil Sci Soc. Am. J.* 64: 1804-1814
- Johnson CE (2002) Cation exchange properties of acid forest soils of the northeastern USA. *European Journal of Soil Science.* 53: 271-282.
- Krauskopf KB (1979). *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill Kogakusha. Tokio, 617 pp.
- Li SY, Chen ZS, Liu JC (1998) Subalpine loamy spodosols in Taiwan: Characteristics, micromorphology and genesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 710-716.
- Lilienfein J, Wilcke W, Ayarza MA, Vilela L, do Carmo-Lima S, Zech W (2000) Soil acidification in Pinus caribea forest on Brazilian savanna Oxisols. *Forest Ecology & Management* 128: 145-157.
- Marshall CE (1977) *The physical chemistry and mineralogy of soils. Vol. II: Soils in place*. Wiley-Interscience Publication.
- Mehra OP, Jackson ML. (1960) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
- Meyer WL, Arp PA (1994) Exchangeable cations and cation exchange capacity of forest soil samples. Effects of drying, storage and horizon. *Can. J. Soil Sci.* 74: 421-429.
- Nanzyo M, Dahlgren R, Shoji S (1993): Chemical characteristics of volcanic ash soils. En: *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. S. Shoji, M. Nanzyo, y R. Dahlgren (eds.). Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands. p. 145-188.

- Nuñez ER (1985) Efectos de la acidez del suelo sobre la producción de cultivos y su corrección mediante el encalado. Serie Cuadernos de Edafología 2. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Chapingo México 56 pp.
- Ortega GF, Mitre L.M, Roldan QJ, Aranda GJ, Morán ZDJ, Alanís AS, Nieto SA (1992) Carta Geológica de la República Mexicana. Esc. 1: 2 000 000, con texto explicativo. 5ª Ed. Consejo de Recursos Minerales Instituto de Geología, U.N.A.M., México, D.F.
- Porta CJ, López-Acevedo M, Roquero de Laburu C (1999) Edafología, para la agricultura y el medio ambiente. 2ª. edición revisada y ampliada Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España 849 pp.
- Schoeneberger PJ, Wysocki DA, Benham EC, Broderson WD (2000) Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos. Traducción al español por Salazar-Lea JC. Título original Schoeneberger PJ, Wysocki DA, Benham EC, Broderson WD (1998) Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE 182 pp.
- SEMARNAP (1999) Estadísticas del medio ambiente, México 1999. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1997-1998. SEMARNAP-INEGI-México Tomo I.
- Skopp JM (2000) Physical properties of primary particles A3-A17. *In*. Sumner, M.E. (Ed in Chief) Handbook of soil science. CRC Press USA
- Smith BFL. (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 (1999) Soil Taxonomy 2nd edition. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture. Madison, WI.
- Takahashi T, Dahlgren RA, Theng BKG, Whitton JS, Soma M (2001) Potassium-selective, halloysite-rich soils formed in volcanic materials from Northern California. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 516 - 526.
- Tan KH (1994) Environmental soil science. Ed. Marcel Dekker, INC. New York. USA.
- Tan KH, Troth PS (1982) Silica-sesquioxide ratios as aids in characterization of some temperate region and tropical soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1109-1114
- Uehara G, Gillman G (1981) The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press. Boulder, Colorado 170 pp.
- USDA-NRCS (2004) Soil Survey Laboratory Methods Manual (editor Rebeca Burt) Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 4.0 United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, 735 pp.
- Van Zuidam RA (1979) Terrain analysis and classification using aerial photographs a geomorphological approach. Enschede, Netherlands, International Training Center, 186 pp.
- West SL, White GN, Deng Y, Mc Innes KJ, Juo ASR, Dixon J.B (2004) Kaolinite, halloysite and iron oxide influence on physical behavior of for mulated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1452-1460.
- Zapata HR (2004) Química de la acidez del suelo. Primera Edición. Cali, Colombia. Impresión Cargraphics Impresion Digital, 208 pp.
- Zhang M, Alva AK, Li YC, Calvert DV (1997) Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under Citrus Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(3): 794-801.
- Zetina LR, Pastrana L, Romero J, Jiménez JA (2002) Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México. Libro Técnico No. 10. C.E. Papaloapan/C.E. Huimanguillo. CIR Golfo Centro 170 pp.

