

ESTUDIOS S AMBIENTALES

realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

2 0 0 4 - 2 0 0 9



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ISBN: 978-607-482-079-9



9 786074 820799



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**ESTUDIOS AMBIENTALES REALIZADOS
EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE HIDALGO**

2004-2009

Editores

Elena María Otazo Sánchez
Claudia Coronel Olivares
Francisco Prieto García
César Abelardo González Ramírez
Alberto José Gordillo Martínez

Comisión revisora

Rosa Icela Beltrán Hernández
Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez
Elena María Otazo Sánchez
Alma Delia Román Gutiérrez
Claudia Coronel Olivares
Francisco Prieto García
César Abelardo González Ramírez



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Luis Gil Borja

Rector

Humberto A. Veras Godoy

Secretario General

Marco Antonio Alfaro Morales

Coordinador de la División de Extensión de la Cultura

Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Coordinador de la División de Investigación y Posgrado

Octavio Castillo Acosta

Director del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Horacio Romero

Director de Ediciones y Publicaciones

Primera edición: 2009

© Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México, CP 42000

Correo electrónico: editor@uaeh.edu.mx

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra

sin el consentimiento escrito

de la UAEH.

ISBN 978-607-482-079-9

PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE SUELOS ÁCIDOS EN EL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO

Enrique Cruz-Chávez,^{1,2*} Otilio A. Acevedo-Sandoval,²
Misael E. Cruz-Sánchez,² Francisco Prieto-García,³
José A. Gordillo-Martínez,³ César Maycotte-Morales⁴

¹Posgrado en Ciencias Ambientales, ICBI, CIQ, ²Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y Materiales, ICBI,

³Centro de Investigaciones Químicas, ICBI,

⁴Centro de Investigaciones Forestales, ICAP. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Ciudad Universitaria, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Col. Carboneras, Pachuca de Soto, Hidalgo, México. *email: ecruz@uaeh.edu.mx

Resumen

La acidificación es un proceso de degradación química del suelo, 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, lixiviación de bases, entre otras. El número de trabajos que abordan este problema en México son escasos. Los objetivos de este estudio fueron a) determinar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos ácidos, y b) clasificar los suelos de acuerdo al criterio de la FAO/ISRIC/SICS (1999). 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 mg m⁻³, densidad real varía de 1.54 a 2.15 mg m⁻³; de textura franco, franco-arenosa y arcillosa; el pH (1:2.5) varió de 6.7 a 4.9, ligeramente ácido a muy ácido; CIC alta (promedio de 30 Cmol+kg⁻¹), materia orgánica mayor a 4% en los horizontes superiores. En la fracción arcilla domina la caolinita, haloisita 7Å, y óxidos de hierro (goethita). La secuencia de los óxidos lábiles en los horizontes Bt es Fe₂O₃ > Al₂O₃ > SiO₂, lo que indica una etapa de intemperización avanzada de los minerales. En la génesis de estos suelos ácidos han influido 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, y 3) los contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales. El material parental, la vegetación, la materia orgá-

nica y el clima son los cuatro factores que influyen sobre la química y la mineralogía de los suelos ácidos. Los suelos se clasificaron como Acrisol húmicos y Acrisol háplico.

Palabras clave: acrisoles, edafogénesis, Acaxochitlán, Hidalgo.

Introducción

Se estima que el 15% de los suelos de la república mexicana están afectados por procesos de acidificación (Semarnap/INEGI, 1999). El estado de Hidalgo cuenta con una superficie total de 2 110 573 hectáreas, de éstas, el 22% de los suelos tienen características ácidas (Acevedo, 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 CO₂ proveniente de la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos, los grupos ácidos y alcohólicos de la materia orgánica, los grupos OH⁻ 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 cuando la concentración de este catión, en la solución del suelo, es mayor de 1 a 2 ppm (Johnson, 2002). La presencia del Al en el medio, agua y suelo, puede ocasionar serios riesgos ecológicos (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 ál.*, 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 cambio, 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 en 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, 2) plantear hipótesis sobre la génesis de estos suelos y 3) clasificar los suelos de acuerdo con el criterio de la FAO/ISRIC/SICS (1999).

Materiales y métodos

Localización y características del área de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de Acaxochitlán, Hidalgo, México; los perfiles se localizan entre las coordenadas 20° 10' 53" y 20° 13' 40" de latitud norte y 98° 12' 35" y 98° 15' 35" de longitud oeste, a una altura promedio de 2 300 m (Figura 1). Esta zona se ubica dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana del cenozoico y ambiente geotectónico de arco continental. Los perfiles estudiados se encuentran en la formación Atotonilco El Grande, constituida 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 microfocristales de andesina y augita (INEGI, 1997).

El clima (Cm) templado húmedo con abundantes lluvias en verano, precipitación anual de 1 200 mm y temperatura media de 15.5 °C (*Diario Oficial del Estado de Hidalgo*, 2001) El régimen de humedad del suelo es údico y el régimen de temperatura del suelo, méxico (*Soil Survey Staff*, 1995). En la región de estudio el uso dominante del suelo es forestal, donde la vegetación que predomina es *Quercus spp* (Perfil 1), *Pinus teocote* (Perfil 2), cultivo de maíz (Perfil 3), *Pinus patula* (Perfil 4), los bosques, en general, presentan una alta perturbación por actividad antropogénica.

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, esta fase se complementó con recorridos por la zona. Se eligieron cuatro sitios representativos del área, al noroeste de la cabecera municipal de Acaxochitlán, Hidalgo, México, a una altitud de 2 250.3 (Perfil 1), 2100 (Perfil 2), 2335 (Perfil 3) y 2244 m (Perfil 4), cada perfil se describió morfológicamente según Ruiz (*et ál.*, 1999). De cada capa y horizonte identificado en campo se colectaron 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 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), 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 secun-

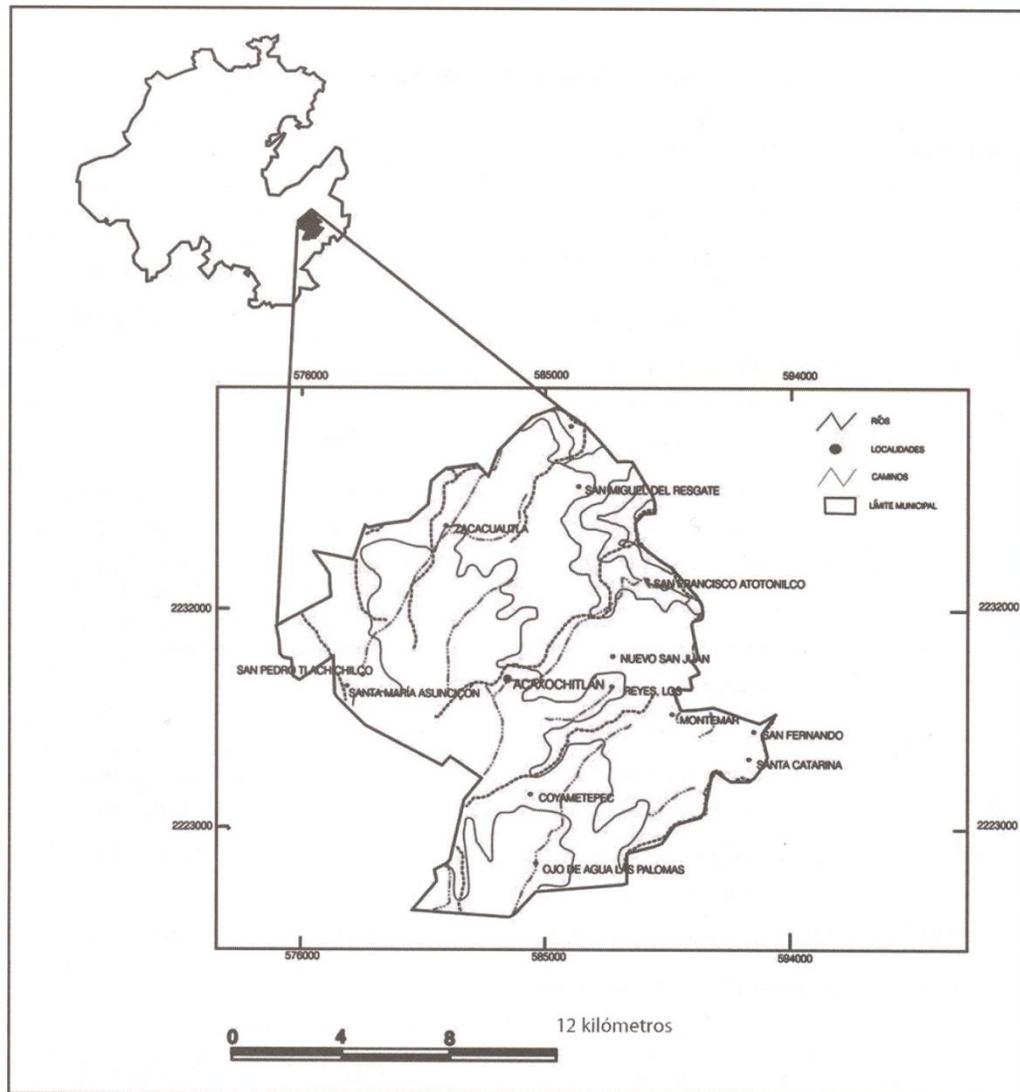


Figura 1. Mapa de localización geográfica del área estudiada.

darios presentes en la fracción fina menor a 2 μm por difracción de rayos X (DRX) en un difractor 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 y 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) marca Perkin Elmer 3000, modelo Lamda 2S. Para establecer la pérdida o ganancia de óxidos totales se aplicó la constante (K) de aluminio (Al_2O_3) (Krauskopf, 1979), comparando el horizonte mas profundo con los horizontes meteorizados.

Tabla 1. Caracterización morfológica de campo de los perfiles estudiados.

Profundidad cm	Estructura	Consistencia en húmedo	Transición
Perfil 1			
0-9	Granular mediana con bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y abrupta
9-37	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y abrupta
37-50	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y gradual
> 50	Bloques subangulares medianos	Firme	-----
Perfil 2			
0-12	Granular fina	Friable	Horizontal y clara
12-22	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y clara
22-38	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y difusa
38-69	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y difusa
69-100	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
> 100	Bloques subangulares medianos	Firme	-----
Perfil 3			
0-9	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Horizontal y gradual
9-22	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
22-30	Bloques subangulares medianos	Firme	Ondulada y difusa
30-50	Bloques subangulares medianos	Firme	Horizontal y difusa
50-66	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Horizontal y difusa
> 66	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	-----
Perfil 4			
0-8	Bloques subangulares medianos y finos	Friable	Ondulada y difusa
8-17	Bloques subangulares medianos	Friable	Ondulada y gradual
17-64	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Ondulada y difusa
64-86	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	Ondulada y difusa
> 86	Bloques subangulares medianos y gruesos	Firme	-----

Resultados y discusión

Morfología

Las características morfológicas se resumen en la Tabla 1. El Perfil 1 se ubica en las coordenadas 20° 10' 53" de latitud norte y 98° 15' 35" a una altitud de 2250.3 m con vegetación de bosque de encino bastante perturbado por actividades humanas y una pendiente del 4%, se localiza a pie de monte. Se identificaron cuatro horizontes, el horizonte A1 con 9 cm de espesor a partir de la superficie; su color es 10YR4/4 pardo amarillo oscuro en seco y 10YR3/4 pardo amarillo oscuro en húmedo, con epipedón mólico, presenta una transición ondulada y abrupta con el siguiente horizonte; consistencia friable en húmedo; estructura débilmente desarrollada granular mediana con bloques subangulares; raíces abundantes de tamaño fino.

El horizonte A2 se localiza a una profundidad de 9 a 37 cm; su color es 2.5Y5/3 pardo olivo claro en seco y 2.5Y3/3 pardo olivo oscuro en húmedo, presenta una transición ondulada y abrupta con el siguiente horizonte; consistencia friable en húmedo; estructura débilmente desarrollada de bloques subangulares, tamaño mediano con abundantes raíces finas y medias. A una profundidad de 37 a 50 cm se encuentra el horizonte Bt que tiene una coloración 10YR4/3 pardo en seco y 10YR4/6 pardo amarillo oscuro en húmedo, presenta una transición ondulada y gradual con el siguiente horizonte, consistencia firme en húmedo, estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio con frecuentes raíces finas y abundantes medias.

El horizonte C se encuentra a 50 cm de profundidad, su color es 2.5Y7/3 amarillo pálido en seco y 2.5Y6/8 amarillo olivo en húmedo, consistencia firme en húmedo, estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares de tamaño medio; raíces abundantes medias y gruesas.

El Perfil 2 se sitúa en las coordenadas 20° 13' 46" de latitud norte y 98° 12' 35" de longitud oeste a una altitud de 2 100 m en el paraje denominado Ocotepc, una pendiente del 6% con vegetación de bosque de ocote moderadamente perturbada por actividades humanas. Se identificaron seis horizontes: el horizonte A1 con 12 cm de espesor a partir de la superficie, su color es 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro en seco y 10YR2/1 negro en húmedo, con epipedón úmbrico presenta una transición horizontal

y clara con el siguiente horizonte, consistencia friable en húmedo, estructura granular fina con abundantes raíces de tamaño fino. El horizonte A2 tiene una profundidad de 12 a 22 cm su color es 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro en seco y 10YR2/1 negro en húmedo, presenta una transición ondulada y clara con el siguiente horizonte: consistencia friable en húmedo, estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y fino; raíces finas y medias; el horizonte A3 con una profundidad de 22 a 38 cm tiene una coloración 10YR4/3 pardo en seco y 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro en húmedo, presenta una transición ondulada y difusa con el siguiente horizonte, consistencia friable en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio con abundantes raíces medias.

El horizonte A4 se encuentra entre 38 y 69 cm, su color es 10YR4/2 pardo grisáceo oscuro en seco y 10YR2/2 pardo muy oscuro en húmedo, límite ondulado y difuso con relación al siguiente horizonte, consistencia friable en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio con abundantes raíces medias. Entre los 69 y 100 cm de profundidad se localiza el horizonte Btw que tiene una coloración 10YR5/3 pardo en seco y 10YR3/4 pardo amarillo oscuro en húmedo, su transición ondulada y difusa con relación al siguiente horizonte, consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y con abundantes raíces gruesas y medias. El horizonte Btw2 con una profundidad mayor de 100 cm, su color es 10YR5/4 pardo amarillento en seco y 10YR3/4 pardo amarillento oscuro en húmedo, consistencia firme en húmedo; estructura moderada a fuertemente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio con raíces gruesas frecuentes.

El Perfil 3 se encuentra en las coordenadas 20° 11' 58" de latitud norte y 98° 14' 22" de longitud oeste a una altitud de 2335 m, con una pendiente del 3%, donde se cultiva maíz criollo bajo condiciones de temporal. Se identificaron seis horizontes, el horizonte A1 con 9 cm de espesor a partir de la superficie; su color 5YR4/3 pardo rojizo en seco y 5YR2.5/2 pardo oscuro rojizo en húmedo, con epipedón úmbrico, límite horizontal y gradual con la siguiente capa, consistencia friable en húmedo; su estructura es granular y

Tabla 2. Análisis físicos de las muestras.

Profundidad cm	Color		Densidad		Porosidad %	Textura %			Clase textural
	Seco	Húmedo	Aparente	Real		Arena	Limo	Arcilla	
0-9	10YR4/4 Pardo amarillo oscuro	10YR3/4 Pardo amarillo oscuro	Perfil 1 1.10	2.06	46.60	36	42	22	Franco
9-37	2.5Y5/3 Pardo olivo claro	2.5Y3/3 Pardo olivo oscuro	1.09	2.02	46.04	48	28	24	Franco arcillo arenoso
37-50	10YR4/3 Pardo	10YR4/6 Pardo amarillo oscuro	1.06	2.14	50.47	30	30	40	Arcilloso
> 50	2.5Y7/3 Amarillo pálido	2.5Y6/8 Amarillo olivo	0.89	1.82	51.10	74	16	10	Franco arenoso
0-12	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR2/1 Negro	Perfil 2 0.63	1.54	59.09	54	42	4	Franco arenoso
12-22	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR2/1 Negro	0.67	1.61	58.39	60	34	6	Franco arenoso
22-38	10YR4/3 Pardo	10YR3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	0.80	1.82	56.04	68	26	6	Franco arenoso
38-69	10YR4/2 Pardo grisáceo oscuro	10YR2/2 Pardo muy oscuro	0.83	2.01	58.71	74	18	8	Franco arenoso
69-100	10YR5/3 Pardo	10YR3/4 Pardo amarillo oscuro	0.92	2.15	57.21	36	16	48	Arcilla
> 100	10YR5/4 Pardo amarillento	10YR3/4 Pardo amarillento oscuro	0.95	2.30	58.70	38	30	32	Arcilloso
0-9	5YR4/3 Pardo rojizo	5YR2.5/2 Pardo oscuro rojizo	Perfil 3 0.78	1.80	56.67	34	44	22	Franco
9-22	2.5YR4/3 Pardo rojizo	2.5YR2.5/2 Pardo oscuro rojizo	0.86	1.87	54.01	28	42	30	Arcilloso
22-30	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo oscuro rojizo	0.95	1.89	49.74	28	46	26	Franco
30-50	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo oscuro rojizo	0.89	1.91	53.40	30	46	24	Franco
50-66	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/4 Pardo oscuro rojizo	0.89	1.86	52.15	38	44	18	Franco
> 66	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/2 Pardo oscuro rojizo	0.79	1.64	51.83	68	22	10	Franco arenoso
0-8	5YR4/3 Pardo rojizo	5YR2.5/2 Pardo rojizo oscuro	Perfil 4 0.76	1.79	57.54	26	42	32	Arcilloso
8-17	2.5YR4/3 Pardo rojizo	2.5YR2.5/2 Rojo muy oscuro	0.88	1.92	54.17	24	36	40	Arcilloso
17-64	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/3 Pardo rojizo oscuro	0.86	1.90	54.74	22	28	50	Arcilla
64-86	7.5YR4/4 Pardo	7.5YR3/3 Pardo oscuro	0.91	1.88	51.60	24	28	48	Arcilla
> 64	5YR4/4 Pardo rojizo	5YR3/4 Pardo rojizo oscuro	0.88	2.09	57.89	24	26	50	Arcilla

de bloques subangulares de tamaño fino de débil desarrollo con abundantes raíces de tamaño fino.

El horizonte Bt, con una profundidad de 9 a 22 cm, presentó un color 2.5YR4/3 pardo rojizo en seco y 2.5YR2.5/2 pardo oscuro rojizo en húmedo, presenta una transición ondulada y difusa con el siguiente horizonte: consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio; raíces de tamaño fino y medianas. A partir de 22 a 50 cm se presentan dos horizontes 2Bt1 (22 a 30 cm) y 2Bt2 (30 a 50 cm) su color 5YR4/4 pardo rojizo en seco y 5YR3/3 pardo oscuro rojizo en húmedo, presenta una transición ondulada y difusa con excepción del 2Bt2 que muestra una transición horizontal y difusa con relación a la siguiente capa, consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de

bloques subangulares de tamaño medio; raíces medias y gruesas.

El horizonte 2BC tiene una profundidad de 50 a 66 cm, su color es 5YR4/4 pardo rojizo en seco y 5YR3/3 pardo oscuro rojizo en húmedo, presenta una transición horizontal y difusa con respecto al siguiente horizonte; consistencia firme en húmedo, estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y gruesos; pocas raíces, finas a delgadas. A una profundidad mayor de 66 cm se localiza el horizonte C que tiene una coloración 5YR4/4 pardo rojizo en seco y 5YR3/3 pardo oscuro rojizo en húmedo; consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y grueso.

Tabla 3. Resultados de los análisis químicos.

Profundidad cm	Horizonte	pH		Δ pH	M. O. %	C %	C.I.C. cmol(+)kg ⁻¹	Bases intercambiables cmol(+) kg ⁻¹				Saturación bases %
		H ₂ O	1:2.5 KCl					Na	K	Ca	Mg	
Perfil 1												
0-9	A1	6.25	4.53	-1.72	3.82	2.22	41.4	1.31	2.06	16.84	3.09	56.28
9-37	A2	6.62	5.61	-1.01	1.36	0.79	36.8	0.68	1.14	19.49	3.83	68.32
37-50	Bt1	6.7	4.9	-1.80	2.1	1.22	36.2	1.34	1.14	12.55	2.3	47.87
> 50	C	5.52	4.23	-1.29	0.13	0.08	42.8	0.83	0.2	0.27	0.09	3.25
Perfil 2												
0-12	A1	4.94	4.1	-0.84	16.21	9.40	17.6	0.93	0.17	0.30	0.08	8.41
12-22	A2	5.13	4.27	-0.86	15.53	9.01	23.6	1.08	0.24	0.37	0.11	7.63
22-38	A3	5.13	4.19	-0.94	6.9	4.00	17	1.07	0.47	0.39	0.1	11.94
38-69	A4	5.2	4.43	-0.77	6.78	3.93	17.6	1.02	0.34	0.40	0.1	10.57
69-100	Btw1	5.18	4.15	-1.03	3.21	1.86	11.6	0.86	0.21	0.44	0.11	13.97
> 100	Btw2	5.15	4.24	-0.91	2.8	1.62	8.8	0.73	0.17	0.30	0.11	14.89
Perfil 3												
0-9	A1	5.48	4.46	-1.02	10.37	6.02	31.40	0.45	2.46	2.03	0.66	17.83
9-22	Bt	5.49	4.48	-1.01	6.18	3.58	20.00	0.32	0.73	1.25	0.39	13.45
22-30	2Bt2	5.48	4.47	-1.01	6.18	3.58	24.40	0.3	0.85	1.27	0.33	11.27
30-50	2Bt3	5.2	4.25	-0.95	2.68	1.55	25.20	0.28	0.82	1.31	0.36	10.99
50-66	2Bt4	5.16	4.24	-0.92	0.47	0.27	27.28	0.27	0.92	1.36	0.51	11.22
> 66	C	5.18	4.23	-0.95	0.7	0.41	28.00	0.23	0.9	1.38	0.5	10.75
Perfil 4												
0-8	A1	6.29	4.78	-1.51	13.17	7.64	44	0.35	0.65	2.31	1.05	9.91
8-17	A2	5.95	4.5	-1.45	6.06	3.52	26	0.23	0.45	1.40	0.83	11.19
17-64	Btw	5.98	4.62	-1.36	0.47	0.27	17	0.21	0.13	1.03	0.97	13.76
64-86	Btw2	6.15	4.58	-1.57	0.47	0.27	25	0.27	0.14	0.88	0.93	8.88
> 86	Btw3	6	4.55	-1.45	0.12	0.07	25.2	0.27	0.12	0.87	0.96	8.81

El Perfil 4 está localizado en las coordenadas 20° 11' 55" de latitud norte y 98° 14' 19" de longitud oeste a una altitud de 2 244 m, con una pendiente del 8% y una vegetación de bosque de pino moderadamente alterada por actividades humanas. Se identificaron cinco horizontes, el horizonte A con 8 cm de espesor a partir de la superficie, color 5YR4/3 pardo rojizo en seco y 5YR2.5/2 pardo rojizo oscuro en húmedo, horizonte de diagnóstico úmbrico; límite ondulado y difuso; consistencia friable en húmedo, estructura débilmente desarrollada de bloques subangulares, tamaño fino; raíces finas abundantes. El horizonte A2 tiene una profundidad de 8 a 17 cm, su color es 2.5YR4/3 pardo rojizo en seco y 2.5YR2.5/2 rojo muy oscuro en húmedo; presenta una transición ondulada y gradual con respecto al siguiente horizonte; consistencia friable en húmedo; con epipedón úmbrico estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y fino; raíces abundantes finas y medias. A una profundidad de 17 a 64 cm se sitúa el horizonte Btw1 que tiene una coloración 5YR4/4 pardo rojizo en seco y 5YR3/3 pardo oscuro rojizo en húmedo; límite ondulado y difuso; consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y grueso; raíces medias frecuentes.

El horizonte Btw2 tiene color 7.5YR4/4 pardo en seco y 7.5YR3/3 pardo oscuro en húmedo, límite ondulado y difuso; consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y grueso; raíces medias y gruesas frecuentes. A una profundidad mayor de 86 cm se localiza el horizonte Btw3 que tiene una coloración 5YR4/4 pardo rojizo en seco y 5YR3/4 pardo oscuro rojizo en húmedo; consistencia firme en húmedo; estructura moderadamente desarrollada de bloques subangulares, tamaño medio y grueso; raíces medias escasas.

Propiedades físicas

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, de forestal a agrícola, que dio como consecuencia la pérdida parcial del

horizonte A por erosión hídrica. Los suelos forestales, Perfiles 1, 2 y 4, presentan un incremento de arcilla con la profundidad (30 a 50% de arcilla) y la presencia de revestimientos arcillosos en los horizontes Bt, producto de la acción de los factores de formación del suelo y de la ocurrencia de procesos específicos o combinación de varios de ellos en el transcurso del tiempo. Marshall (1977) menciona que la acumulación de arcilla que se presenta en los suelos es producto de la importante lixiviación que tiene lugar durante 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⁻³, ésta se incrementa con la profundidad con excepción del Perfil 1 que se reduce. West (*et ál.*, 2004) reportan que suelos que presentan una densidad aparente baja, permeabilidad alta y resistencia a la erosión bajo condiciones de precipitación elevada, propia de suelos que contienen frecuentemente haloisita y óxidos de hierro, situación que prevalece en estos suelos.

La densidad real varió de 1.54 a 2.30 mg/m³ y tiende a aumentar con la profundidad del suelo en los Perfiles 2, 3 y 4, lo que indica la presencia de materiales menos intemperizados. La densidad real es congruente con la naturaleza del material parental (Tabla 2), 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 con buena aireación, buen drenaje y adecuada porosidad.

Propiedades químicas

La Tabla 3 presenta los valores promedios obtenidos para algunas propiedades químicas de los cuatro perfiles. Los resultados indican que los Perfiles 2 y 4 tienen un alto contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales, en el Perfil 3 se considera medio, y muy bajo para el Perfil 2; el porcentaje de materia orgánica decrece con la profundidad del suelo hasta llegar a valores considerados como muy pobres (Aguilar-Santelises, 1988), el contenido de carbono orgánico es muy alto en los primeros horizontes y tiende a disminuir al aumentar la profundidad del suelo. El suelo cultivado (Perfil 3) presentó un epipedón úmbrico debido

al contenido de materia orgánica, lo anterior sugiere una reciente incorporación de ese terreno a la agricultura.

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 presentó un incremento de la acidez con relación a la profundidad del suelo, estos resultados coinciden con lo reportado por Porta *et ál.*, (1994), la acidez generalmente aumenta con la profundidad en áreas de alta precipitación. Lilienfein *et ál.*, (2000) y Brady y Weil (1999) mencionan que

Tabla 4. Óxidos lábiles de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y sus relaciones molares en los perfiles.

Profundidad	Al	Fe	Si	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	SiO ₂ / Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
0-9	0.13	1.15	0.169	0.25	1.64	0.36	2.50	0.58	0.19
9-37	0.139	1.29	0.096	0.26	1.84	0.21	1.33	0.30	0.10
37-50	0.173	1.5	0.266	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
0-12	2.91	2.14	0.95	5.50	3.06	2.03	0.63	1.77	0.24
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	4.30	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
0-9	0.65	2.03	0.18	1.23	2.90	0.39	0.53	0.35	0.09
9-22	0.78	2.8	0.18	1.47	4.00	0.39	0.44	0.26	0.07
22-30	0.83	2.73	0.18	1.57	3.90	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	0.30	1.14	0.25	0.08
> 66	0.21	2	0.18	0.40	2.86	0.39	1.65	0.36	0.12
0-8	0.43	2.42	0.12	0.81	3.46	0.26	0.54	0.20	0.06
8-17	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	0.30	0.69	0.15	0.05

las coníferas incrementan la acidez del suelo y, asociada con ésta, se alteran procesos edáficos como: hidrólisis ácida, lixiviación de cationes básicos, nitrificación y actividad fúngica.

Los suelos con altos contenidos de materia orgánica pueden tener a la vez una mayor CIC y pH 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⁺ y por consecuencia pH ácidos (Johnson, 2002). Zapata (2004) menciona que la acidez incide directamente en la fertilidad de los suelos, ocasionando un mayor o menor grado de 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.

En relación con 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. El Perfil 1 muestra contenidos altos de cationes intercambiables (Tabla 3). El porcentaje de saturación de bases es mayor del 50% en el Perfil 1 y tendió a disminuir según la profundidad del suelo, mientras que en los Perfiles 2, 3 y 4 es menor del 20%, incrementándose las saturaciones con relación a la profundidad del suelo, esto indica un grado de desaturación o eliminación de bases por lixiviación y lavado del suelo. 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 más rápida y puede efectuarse en el curso de un año, a diferencia de las coníferas que tardan de siete a diez años, liberándose los compuestos minerales de la materia orgánica, acumulándose éstos en los horizontes superficiales.

La capacidad de intercambio catiónico en general se puede considerar alta (promedio de 30 Cmol+kg⁻¹), lo que se atribuye, en gran parte, a la presencia de sesquióxidos (Johnson, 2002), al contenido de materia orgánica y a la naturaleza de las arcillas. Takahashi *et ál.*, (2001) mencionan que al presentarse un desorden en la estructura cristalina de la haloisita, ésta puede ser responsable de una mayor área superficial y de la capacidad de intercambio

catiónico. En suelos forestales de Nueva Inglaterra y del noreste de USA, 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 y Arp (1994) reportan que en suelos forestales ácidos, al determinar la capacidad de intercambio catiónico con NH₄OAc 1N (pH, 7.0), tiende a exceder los resultados, situación que prevaleció en el presente trabajo. Li *et ál.*, (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.

Óxidos lábiles

La Tabla 4 presenta los resultados de los óxidos lábiles, en general el aluminio y silicio decrecen con la profundidad del suelo, lo que indica que parte de éste 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 a la profundidad.

La relación molar de los óxidos lábiles, SiO₂/Al₂O₃ y SiO₂/Fe₂O₃, muestra la alteración que se presenta en el perfil de intemperismo. La relación SiO₂/Al₂O₃ en el Perfil 1 es significativa desde el punto de vista de alteración, sólo en los primeros 50 cm, donde las relaciones oscilan de 1.33 a 2.95 manifiestan procesos de transformación, se corrobora con la relación SiO₂/Fe₂O₃ donde inciden de forma directa los factores pedogenéticos. Posterior a esta profundidad se tienen valores altos que sugieren una alteración relativa de los minerales primarios (Tabla 4).

Las relaciones moleculares SiO₂/Al₂O₃ de los Perfiles 2, 3 y 4, menores a 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: Fe₂O₃ > Al₂O₃ > SiO₂, lo que indica una etapa de intemperización avanzada de los minerales debido a las condiciones climáticas que prevalecen en la zona de estudio y la naturaleza básica del material geológico.

Mineralogía

La fracción fina estuvo dominada por caolinita, haloisita 7Å, óxidos de hierro (goethita), cuarzo y albita; en general, todas las muestras fueron dominadas por caolinita. Dixon (2000) reportó que la caolinita es un material ubicuo y es especialmente abundante en suelos ácidos, esto coincide con lo reportado en el presente trabajo. La extracción de sílice (desilificación) de los minerales primarios y secundarios fue promovida por la acidez del suelo. La caolinita es el resultado de la desilificación de los minerales primarios, por lo que su elevada abundancia puede atribuirse al bajo pH del suelo. La presencia de hierro como goethita (óxido de hierro cristalino) depende de una buena aireación, una temperatura y humedad adecuada, además de un alto potencial reductor-oxidante en el suelo (Acevedo-Sandoval *et ál.*, 2004).

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 de hierro y aluminio. 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 (K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) e incremento concomitante de cationes metálicos (Al^{+3} , Fe^{+3} , Mn^{+4}) que pueden sufrir hidrólisis ácida (Zapata, 2004).

En la génesis de estos suelos los siguientes factores han jugado un papel importante: 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 horizontes de iluviación con altos contenidos de arcilla, óxidos de hierro, moteado de oxidación-reducción y reducción de la porosidad con la profundidad, y 4) elevados contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales.

Clasificación de los suelos

Los suelos ácidos se clasificaron con base en los criterios propuestos por la FAO/ISRIC/SICS (1999), los perfiles 1, 2 y 3

corresponden al grupo Acrisol húmico y el suelo del Perfil 4 pertenece a Acrisol háplico. Suelos que se caracterizan por presentar un horizonte B árgico, con una CIC menor del $16 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ de arcilla y una saturación de bases menor a 50% en la mayor parte entre 25 y 100 cm en Perfil 1, en el horizonte A2 se presentaron procesos de iluviación que se expresan por una textura más gruesa que en el horizonte A1 y Bt1; la materia orgánica también presenta un comportamiento similar, sin embargo, estas propiedades no son suficientes para caracterizarlo como un horizonte álbico.

Conclusiones

Los suelos ácidos se formaron a partir del intemperismo de rocas basálticas, por ello los suelos son profundos, tienden a la acidez, son ricos en materia orgánica, elevada CIC, desbasificación y un aumento en el contenido de arcilla con respecto al horizonte suprayacente debido a los procesos edafogénicos resultado de una compleja interacción del clima, el relieve, tipo de vegetación, contenido de materia orgánica y la dinámica del agua. 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. La secuencia de los óxidos lábiles que se presentan en los horizontes Bt es: $Fe_2O_3 > Al_2O_3 > SiO_2$, lo que indica una etapa de intemperización avanzada de los minerales. La mineralogía de la fracción arcilla está dominada por caolinita y haloisita. Los suelos se clasificaron como Acrisol húmico y Acrisol háplico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo el financiamiento otorgado para realizar la presente investigación por medio del Programa Institucional de Investigación (PII-2004) y al Conacyt por la beca de estudios de posgrado nacional número 216391.

Referencias

- Acevedo-Sandoval, O. A. et ál., 2004, "El papel de óxidos de hierro en suelos". *TERRA Latinoamericana* 22 (4), p. 485-497.
- Acevedo-Sandoval, O. A., 2000, *Degradación y contaminación de los suelos del estado de Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, México, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Aguilar-Santelises, A., 1988, Métodos de análisis de suelos. Chapingo, México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- DIARIO 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.
- FAO/ISRIC/SICS, 1999, "Base referencial mundial del recurso suelo". Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Roma, Italia.
- Gensemer, R. W. y R. C. Playle, 1999, "The bioavailability and toxicity of Aluminium in aquatic environments". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29 (4), p. 315-450.
- INEGI, 1997, "Acaxochitlán, Estado de Hidalgo. Cuaderno Estadístico Municipal, edición 1996". Aguascalientes, México.
- Krauskopf, K. B., 1979, *Induction to Geochemistry*. Kogakusha, Tokio, McGraw-Hill.
- Li, S. Y., Z. S. Chen y J. C. Liu, 1998, "Subalpine loamy spodosols in Taiwan: Characteristics, micromorphology and genesis". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, p. 710-716
- Lilienfein, J. et ál., 2000, "Soil acidification in *Pinus caribea* forest on Brazilian savanna Oxisols". *Forest Ecology & Management* 128, p. 145-157.
- Marshall, C. E., 1977, *The physical chemistry and mineralogy of soils*. Vol. II: Soils in place. Wiley-Interscience Publication.
- Mehra, O. P. y M. L. Jackson, 1960, "Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate". *Clays and Clay Minerals* 7, p. 317-327.
- Meyer, W. L. y P. A. Arp, 1994, "Exchangeable cations and cation exchange capacity of forest soil samples. Effects of drying, storage and horizon". *Can. J. Soil Sci.* 74, p. 421-429.
- Porta, C. J., M. López-Acevedo y C. Roquero de Laburu, 1994, *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España, Ediciones Mundi-Prensa.
- Ruiz, C. J. et ál., 1999, *Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno*. Textos UAP, Serie Apoyo a la Docencia, Dirección General de Fomento Editorial, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- SEMARNAP/INEGI, 1999, "Estadísticas del medio ambiente, México 1999". *Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1997-1998*, tomo I. México, Semarnap/INEGI.
- SOIL SURVEY STAFF, 1995, "Clave para la taxonomía de suelos, versión 1994". Ortiz-Solorio, C., M. C. Gutiérrez-Castorena y J. L. García-Rodríguez, traductores, primera Edición. *Publicación Especial 3*, Chapingo, México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS).
- SOIL SURVEY LABORATORY, 1996, "Methods Manual". *Soil Survey Investigations Report 42*, ver. 3.0. Washington, DC, US Department of Agriculture.
- Takahashi, T. et ál., 2001, "Potassium-selective, halloysite-rich soils formed in volcanic materials from Northern California". *Soil Science Society of American Journal* 65, p. 516-526.
- West, S.L. et ál., 2004, "Kaolinite, halloysite and iron oxide influence on physical behavior of forest soils". *Soil Science Society of American Journal* 68, p. 1452-1460.
- Zapata, H. R., 2004, *Química de la acidez del suelo*, primera edición. Cali, Colombia, Impresión Cargraphics, Impresión Digital.
- Zhang, M. et ál., 1997, "Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under Citrus Production". *Soil Science Society of American Journal* 61 (3), p. 794-801.
- Zetina, L.R. et ál., 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.