

PALEOSUELOS: ÍNDICES DEL PALEOAMBIENTE Y DE LA ESTABILIDAD DEL PAISAJE DEL NEVADO DE TOLUCA

Paleosols: Evidence of Paleoenvironment and Landscape Stability of the Nevado de Toluca Volcano

C. Jasso-Castañeda^{1†}, Sergey Sedov¹, J. E Gama-Castro¹ y E. Solleiro-Rebolledo¹

RESUMEN

La secuencia pedostratigráfica constituida por depósitos volcánicos y paleosuelos que se localiza en el volcán Nevado de Toluca, representa una valiosa herramienta para la reconstrucción paleoambiental. En este estudio, la memoria de los paleosuelos fue esencial para generar datos relativos al paleoambiente y la estabilidad del paisaje. Su interpretación se realizó con base en los horizontes de diagnóstico y en las propiedades distintivas más perdurables de los paleosuelos. La escala cronológica se integró con fechamientos de ¹⁴C. Éstos se efectuaron tanto en paleosuelos, como en sedimentos volcánicos. Los resultados obtenidos indicaron: 1) la existencia de paleosuelos cuyas edades fluctuaron del Pleistoceno Tardío al Holoceno; 2) la presencia de tres conjuntos de paleosuelos diferenciados entre sí, por presentar, respectivamente, horizonte vítrico, horizonte cámbico y horizonte árgico; y 3) la ocurrencia de fluctuaciones en el clima y en la estabilidad del paisaje que originaron estas diferencias. El grado de estabilidad del paisaje y las fluctuaciones climáticas que ocurrieron en el área de estudio durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno son viables de inferir en función del tipo de horizontalización alcanzada por los paleosuelos, así como por la información contenida en los rasgos pedogénicos que integran su memoria.

Palabras clave: memoria del suelo, pedostratigrafía.

SUMMARY

Pleistocene-Holocene sequence of volcanic deposits and paleosols located in the Nevado de Toluca volcano, is a valuable tool for paleoenvironmental reconstruction. In this research, the paleosol memory was an important

¹ Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

[†] Autor responsable (carolina@geología.unam.mx)

Recibido: abril de 2003. Aceptado: enero de 2006.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 24: 151-161.

consideration in evaluating the paleoenvironment and landscape stability. Chemical, physical, micro-morphological, and mineralogical properties of paleosols were considered as soil memory carriers. C¹⁴ dating of paleosols humus and volcanic sediments also supported the paleosol memory. The obtained results were 1) the presence of paleosols that were dated as Pleistocene-Holocene units; 2) three paleosol groups identified by their diagnostic horizons (vitric, cambic, and argic); and 3) occurrence of climatic and landscape fluctuations of variable length. These results suggest that the stability level of the studied landscape and the climatic fluctuations can be recognized according to the evolutionary age reached by the soils and also by the information contained in pedogenic characteristics that are part of its memory.

Index words: soil memory, pedostratigraphy.

INTRODUCCIÓN

Los paleosuelos, de modo similar a los sedimentos, también pueden utilizarse como herramientas eficientes para la reconstrucción paleoambiental y la evaluación de los periodos de estabilidad-inestabilidad del paisaje (Jasso-Castañeda *et al.*, 2002; García y Muñoz, 2002).

Hasta reciente, las investigaciones realizadas para establecer el registro paleopedológico de cambio ambiental y estabilidad del paisaje durante el Cuaternario se habían basado sólo en las secuencias de loess-paleosuelos. Sin embargo, en la actualidad, el estudio de los paleosuelos en regiones volcánicas se ha incrementado de modo notable (Sedov *et al.*, 2001, 2003a,b; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2004). El estudio se realizó en una secuencia de paleosuelos localizada en áreas aledañas al volcán Nevado de Toluca. La importancia del sitio de estudio radica en la atención significativa que se le ha dado en los últimos años, debido a que se le considera como área de alto riesgo volcánico (Macías *et al.*, 1997). Además, esta área se conceptúa como un modelo de la dinámica de un paisaje volcánico (García-Palomo *et al.*, 2002) y de la evolución

del ambiente que prevaleció durante el Cuaternario Tardío (Caballero *et al.*, 2001).

El objetivo del presente trabajo es proponer con base en la información registrada en la memoria de los paleosuelos: 1) el tipo de paleoambiente en que se formaron los paleosuelos y 2) establecer los periodos de estabilidad-inestabilidad del paisaje ocurridos localmente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende tres localidades: 1) Arroyo la Ciervita, situada en las coordenadas 19° 13' 28.4" N y 99° 47' 05.1" O; 2) Zacango (19° 11' 34" N y 99° 39' 02" O) 3) San Pedro Tlanisco (19° 04' 18" N y 99° 39' 34" O) (Figura 1). Desde un punto de vista geológico, García-Palomo *et al.* (2002) señalaron que todos los sitios se ubican en las laderas de flujos piroclásticos del Volcán Nevado de Toluca.

El clima actual en estas localidades es templado húmedo, con una temperatura anual que oscila entre 4 y 12 °C y una precipitación anual de 1100 mm (García, 1988). La vegetación presente incluye pinos, oyameles, ailes, cedros, encinos y algunos pastos. De acuerdo con la WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) los suelos modernos que predominan son Andosoles y Cambisoles.

Los paleosuelos se describieron en campo de acuerdo con la metodología propuesta por el US Department of Agriculture (USDA, 1992). En esta etapa, se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas de horizontes, capas y rocas para su análisis y fechamiento. La clasificación de los paleosuelos así como la designación de sus horizontes, sólo se aproximaron, debido a que, con frecuencia, varias de sus propiedades diagnósticas fueron modificadas por la erosión y el sepultamiento. En el presente estudio, los análisis realizados incluyeron:

1. Color en húmedo, (Munsell, 1975); 2) pH en NaF, relación 1:50 (Fieldes y Perrott, 1966); 3) carbono

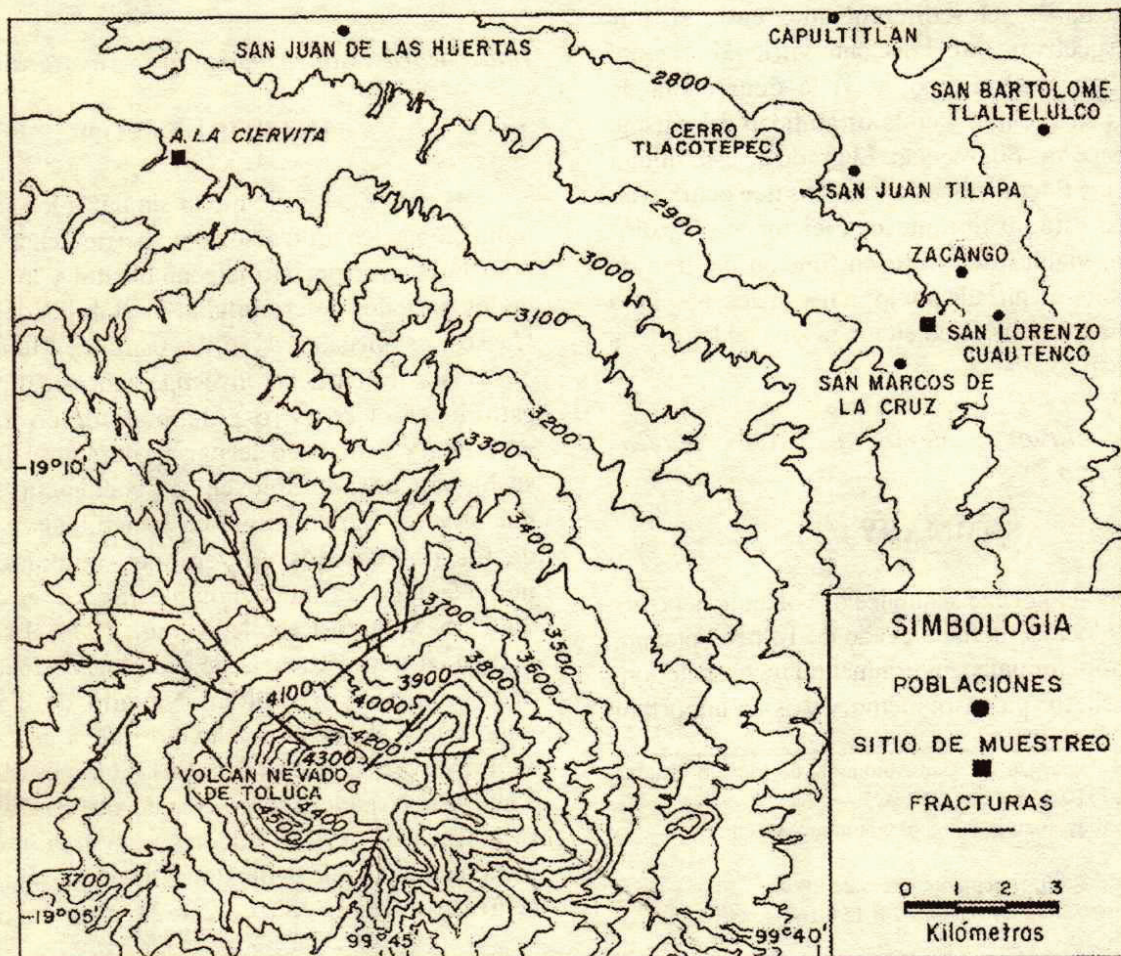


Figura 1. Localización del área de estudio.

orgánico total (USDA, 1990); 4) porcentaje de arcilla (USDA, 1990); 5) mineralogía de la fracción arcilla (USDA, 1990); 6) porcentaje de vidrio volcánico por conteo de granos (USDA, 1990); 7) porcentaje de hierro y aluminio extraídos con ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960) y oxalato de amonio (Parfitt, 1989). Con base en los resultados de estos análisis, se establecieron los índices: a) grado de cristalinidad del hierro (Feo/Fed) y b) propiedades ándicas: $Alo+1/2 Feo$ (USDA, 1988).

De modo colateral, esta investigación también se apoyó en los estudios micromorfológicos realizados en paleosuelos del área por Sedov *et al.* (2001; 2003b). Finalmente, las muestras de horizontes inalterados se enviaron para su fechamiento por ^{14}C al Instituto de Academias de Ciencia Rusa de Moscú. Todos los fechamientos se obtuvieron a partir de la materia orgánica. Este marco cronológico se complementó con otras edades publicadas por Bloomfield y Valastro (1974), Macías *et al.* (1997), García-Palomo *et al.* (2002), Arce *et al.* (2003) y Solleiro-Rebolledo *et al.* (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución Pedoestratigráfica de los Paleosuelos

Con base en los datos de campo, se elaboró una columna pedoestratigráfica compuesta (Figura 2). La columna subyace a un suelo moderno (SM) fechado en $3,435 \pm 50$ años a.P. (Macías *et al.*, 1997) y está constituida por ocho unidades paleopedológicas, denominadas y numeradas como PT0 a PT7. Asimismo, esta columna también muestra, intercalados entre los paleosuelos, cinco materiales geológicos de diferente edad, denominados respectivamente: 1) Pómez Toluca Superior (UTP), fechado por Arce *et al.* (2003) en $10,445 \pm 90$ años a.P.; 2) Flujo de Pómez Blanca (WPF) con una edad estimada por García-Palomo *et al.* (2002) en $12,040 \pm 90$ años a.P.; 3) Pómez Toluca Inferior (LPT) fechado por Bloomfield y Valastro (1974) en $24,260 \pm 670$ años a.P.; 4) Depósito de flujos de cenizas y bloques grises (GBAF) fechado por Macías *et al.* (1997) en $37,000 \pm 1125$ años a.P. y 5) Flujo de pómez de color rosa (PPF) originado por un colapso de la columna del volcán que ocurrió hace $42,030 \pm 350/-2445$ años a.P. (Macías *et al.*, 1997)

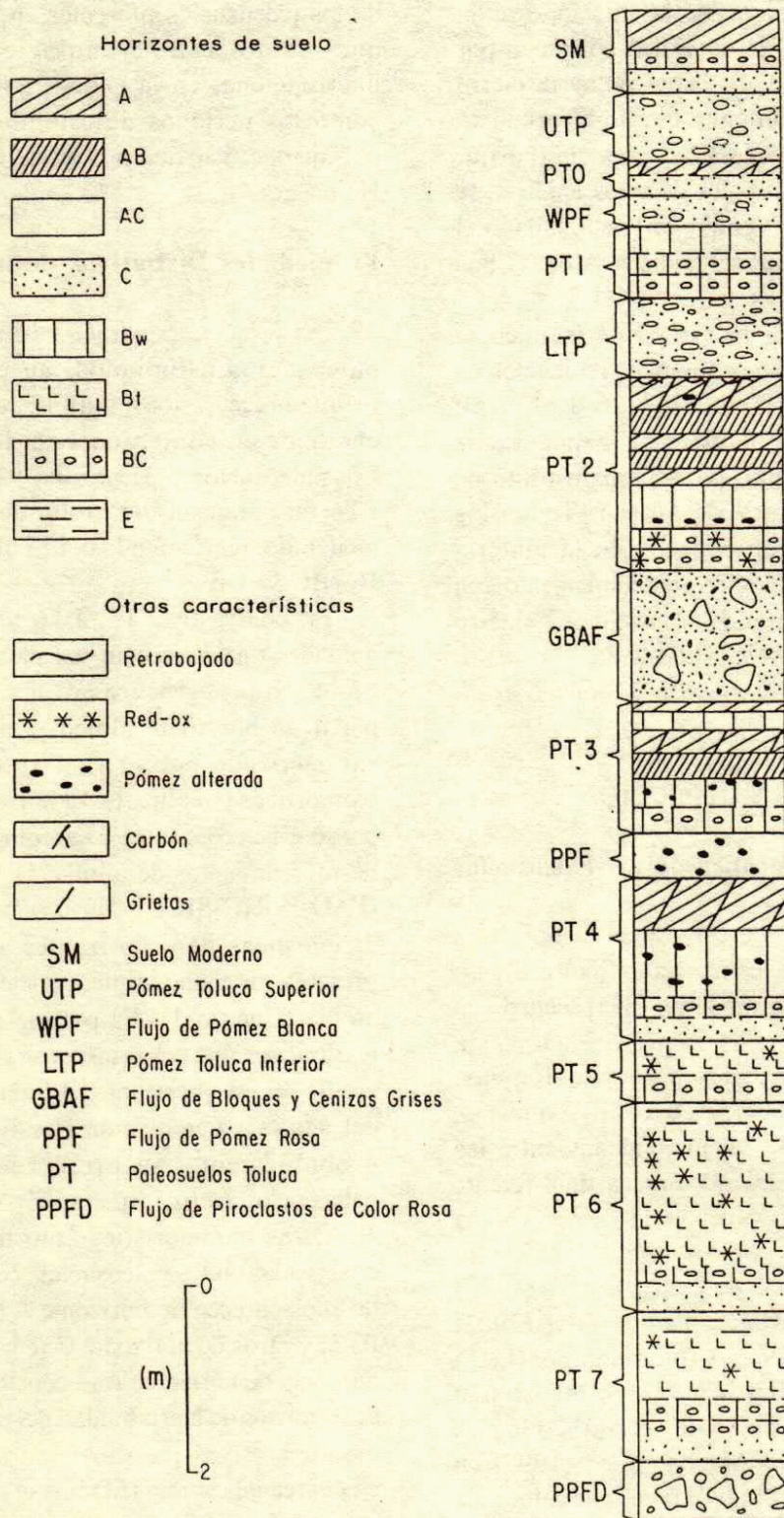
La importancia geocientífica de estos materiales y de los paleosuelos presentes en la columna, radica en que establecen cronológicamente, tanto las interrupciones en la pedogénesis de los paleosuelos, como los periodos de estabilidad-inestabilidad del paisaje que ocurrieron durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno.

Propiedades Distintivas de los Paleosuelos

Las principales características morfológicas de los paleosuelos estudiados, su edad absoluta y sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas se encuentran contenidas en los Cuadros 1 y 2. Los paleosuelos presentes en PT0, PT1, PT2, PT3 y PT4 muestran un desarrollo que fluctúa de escaso a moderado, representado por perfiles de tipo A/C, A/AB, Bw/BC y A/Bw.

En contraste, PT5, PT6 y PT7 resultan ser las unidades que presentan los paleosuelos con la mayor evolución pedogenética, ya que éstos muestran en su perfil un horizonte álbico y un horizonte B árgico, caracterizado por su riqueza en rasgos iluviales y oximórficos (Cuadro 1). El horizonte álbico es de color pardo grisáceo oscuro y carece de estructura, así como de revestimientos de arcilla. De acuerdo con la WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999), estas características son diagnósticas para horizontes álbicos. Sin embargo, presenta, de modo atípico, contenidos significativos de arcilla (Cuadro 1). Es posible que esta característica textural resultó del transporte y de la acumulación de arcilla en este horizonte, debido a un efecto mecánico del agua de percolación (lessivage). Este fenómeno, probablemente, se presentó después de que los paleosuelos fueron sepultados.

Otras características morfológicas importantes, observadas en los paleosuelos, consisten en que algunos de ellos carecen de horizonte A (e.g. PT1, PT5, PT6 y PT7) y otros de horizonte C (e.g. PT1, PT2 y PT3). La ausencia de horizonte A se considera como un resultado de los ciclos de inestabilidad del paisaje, propiciados por eventos erosivos que ocurrieron, de modo multitemporal, en el área de estudio (Macías *et al.*, 1997). La ausencia de horizonte C (Figura 3) se explica como resultado de la formación de suelos policíclicos que constituyeron pedocomplejos (Jasso-Castañeda *et al.*, 2002).



Dib. Luis Surgos P, Fernando A. Vega L.

Figura 2. Columna pedostratigráfica compuesta.

Propiedades Selectas que Conforman la Memoria de los Paleosuelos

Los Cuadros 1 y 2 muestran los datos obtenidos para varias propiedades distintivas de la memoria de los paleosuelos. Al respecto, destacan:

Mineralogía de las arcillas cristalinas. En los paleosuelos PT1, PT2, PT3 y PT4, la haloisita 7 Å y la haloisita 10 Å están presentes en cantidades significativas, aunque asociadas con porcentajes pequeños de caolinita (Cuadro 2). Se propone que la coexistencia de estas arcillas en los paleosuelos de evolución moderada o ligera es indicativa de cambios en las condiciones macro y microambientales durante la pedogénesis (Velde, 1995). Esta propuesta se apoya con las observaciones micromorfológicas realizadas por Sedov *et al.* (2001; 2003b). Con respecto a la presencia de la caolinita, es probable que ésta se formó en etapas tempranas de intemperismo debido a la desestabilización de algún mineral primario que contenía aluminio, como lo son las plagioclasas (Velde, 1995).

En PT5, PT6 y PT7, la caolinita se encuentra entre los principales componentes minerales junto con la haloisita 10 Å (Cuadro 2) lo cual es atribuible, según USDA (1988), a un mayor intemperismo en un ambiente húmedo, pero con un periodo de sequía y un lapso considerable de estabilidad del paisaje.

Carbono orgánico (CO). El contenido más alto de CO en los paleosuelos resultó diagnóstico para los horizontes A (Cuadro 2). Sin embargo, se observa una tendencia a disminuir su porcentaje conforme se incrementa la edad del paleosuelo. Es probable que fluctuaciones en el clima, principalmente en la humedad y temperatura y la diagénesis ocurridas a través del tiempo, así como la erosión que se presentó reiteradamente en el área (Arce *et al.*, 2003) fueron mecanismos trascendentales en la pérdida de CO en estos paleosuelos.

pH en NaF. Con excepción del horizonte A₁₂ presente en PT4, todos los demás horizontes tuvieron valores menores que 9.5. Con base en WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) es posible considerar que, en general, los paleosuelos carecen de productos alofánicos en cantidad suficiente para ser considerados como horizontes ándicos.

Propiedades ándicas Alo+1/2Feo. Con excepción de PT1 y PT2, ninguno de los otros paleosuelos muestra propiedades ándicas. Esto significa, en el caso de PT3 y PT4, que el grado de intemperismo alcanzado no propició la presencia de amorfos de alófono o de complejos

humus-Al en cantidades significativas o que éstos cristalizaron hacia arcillas (Shoji *et al.*, 1993).

Grado de cristalización del hierro (Feo/Fed). Los paleosuelos, en general mostraron valores medios (> 0.40) para esta relación (Cuadro 2). Este grado de cristalinidad del hierro también está relacionado con las condiciones de sitio donde se desarrollaron los paleosuelos, indicando lo siguiente: 1) presencia de ecosistemas forestales con vegetación acidificante (Caballero *et al.*, 2001); 2) porcentajes altos de materia orgánica en el epipedón de los paleosuelos, los cuales estabilizaron a los amorfos de hierro a través de su actividad electrostática (Sedov *et al.*, 2001); 3) condiciones óxido-reductoras que aún son evidentes en algunos paleosuelos (e.g. PT2 y PT3); y 4) un clima pedológico suficientemente húmedo para impedir su cristalización (Shoji *et al.*, 1993).

Análisis Micromorfológico

El análisis evidenció que, en la mayoría de los epipedones que caracterizan a los paleosuelos, se desarrolló una estructura granular fina o migajosa ultrafina muy estable. Estos agregados, según señalaron Sedov *et al.* (2003b), muestran una distribución en la matriz del horizonte, similar a la que presentan los Andosoles modernos (Figura 4a). Se estima que este arreglo estructural le confirió a los horizontes A una densidad aparente baja, gran porosidad y una buena permeabilidad, lo cual facilitó el crecimiento radicular. También se observó que, en estos horizontes, el material orgánico que aún se conserva está ampliamente distribuido en la matriz proporcionándole una coloración uniforme. Con excepción del horizonte A, presente en la unidad PT4, todos los demás horizontes A carecen de rasgos de iluviación de arcillas. De acuerdo con USDA (1988), esta carencia se debe a que, en la zona de actividad radicular, la formación, transformación y destrucción de los agregados, requiere de menos tiempo para llevarse a cabo que el proceso de iluviación.

De modo particular, el horizonte A de PT2 (profundidad de 0 a 15 cm), así como el horizonte A de PT3 (profundidad de 20 a 40 cm) muestran la coexistencia de dos tipos de agregados (granulares y bloques subangulares). Las áreas que muestran estructura subangular presentan compactación y menor porosidad (Figura 4b). Los horizontes A de PT2 y PT3 se caracterizan, además, porque su matriz muestra

Cuadro 1. Macromorfología de los paleosuelos presentes en la columna pedoestratigráfica.

Unidad	Horizonte	Profundidad cm	Color en húmedo	Estructura [†]	Clase textura [‡]	Arcilla %	Edad ¹⁴ C años a.P.
PT0	A	0 a 7	10YR 2/1	Gr, F-2	Ma	n.d. [§]	11,595 ± 180
	C	7 a 30	10YR 7/1	L	n.d.	n.d.	(Arce <i>et al.</i> , 2003)
PT1	Bw	0 a 35	10YR 3/4	Bsa, M-2	Ra	38.2	13,480 ± 40
	BC	35 a 60	10YR 3/4	Bsa, M-2	C	24.9	(Solleiro <i>et al.</i> , 2004)
PT2	A ₁₁	0 a 15	10YR 2/2	Gr-Ba, F-G, 2-3	Ma	16.7	27,900±500
	A ₁₂	15 a 45	10YR 2/1	Gr, F-2	Ma	16.2	(Sedov <i>et al.</i> , 2001)
	AB	45 a 80	10YR 3/2	Gr, M-2	Mra	24.3	
							29,000 ± 1,200
	A	80 a 95	10YR 2/1	Gr, F-2	C	26.2	(Sedov <i>et al.</i> , 2001)
	AB	95 a 120	10YR 3/2	Gr, M-2-3	C	24.3	31,300 ± 900
							(Sedov <i>et al.</i> , 2001)
	A	120 a 160	10YR 2/2	Gr, F-2	C	21.9	
	Bw	160 a 200	10YR3/4	Bsa, M-2	C	23.8	
	BCg	> 200	10YR 3/4	Bsa, M-2	Ma	13.3	
PT3	A	0 a 6/10	10YR 2/1	Gr, F-2	Ma	19.7	38,700±600
	AC	10 a 15/20	10YR 4/4	Gr, F-1	Ma	12.9	(Solleiro <i>et al.</i> , 2004)
							39,600±1,000
	A	20 a 40	10YR 2/1	Gr-Ba, F-G, 2-3	Ma	11.3	(Sedov <i>et al.</i> , 2001)
	AB	40 a 70	10YR 2/1	Gr, M-2	Ma	15.3	
	Bw	70 a 110/120	10YR3/4	Bsa, M-2	Mra	21.2	
PT4	BC	120 a 182	10YR 3/2	Bsa, M-1,2	Ma	19.4	
	A ₁₁	0 a 8	10YR 3/4	Gr, M-3	Ma	17.6	45,300 ± 900
	A ₁₂	8 a 33	10YR 3/2	Gr, M-3	Mra	24.8	
	B1	33 a 60	10YR 3/2	Ba, G-2,3	Mra	24.5	
	B2	60 a 90	10YR 3/4	Ba, G-3	Ma	17.9	
	BC	90 a 120	10YR 4/6	Bsa, M-2	Ma	13.3	
	C	> 120	10YR 5/6	L	Ma	12.8	
PT5	Bt	0 a 30	7.5YR 4/6	Ba, G-3	Mra	27.2	
	BC	30 a 50	7.5YR 4/6	Ba, G-2,3	Mra	21.4	>50,000
PT6	E	0 a 30	10YR 4/2	L	Ra	36.5	
	Bt ₁	30 a 45	7.5YR 4/6	Ba, M-3	Mra	34.1	>50,000
	Bt ₂	45 a 70	7.5YR 4/6	Ba, M-3	Mr	35.9	
	Bt ₃	70 a 180	7.5YR 3/4	Ba, M-3	R	40.5	
	BC	180 a 220	10YR 4/4	Ba, M-2,3	R	48.2	
	C	220 a 255	10YR 3/4	L	Ma	14.1	
PT7	E	0 a 15	10YR 3/4	L	Mra	27.4	
	Bt1	15 a 45	10YR 3/2	Ba, G-1	Mr	32.1	>50,000
	Bt2	45 a 75	10YR 3/4	Ba, M-2,3	Mra	27.6	
	BC	75 a 135	10YR 3/6	Ba, M-2	C	21	
	C	135 a 195	10YR 2/1	Bsa, M-2	Ma	11.6	

[†] Forma de la estructura: L = sin estructura, Gr = granular, Ba = bloques angulares y Bsa = bloques subangulares. Tamaño: F = fino, M = medio, G = grueso. Desarrollo: 1 = débil, 2 = moderado, 3 = fuerte.

[‡] Textura: Ma = migajón arenoso, Mra = migajón arcillo-arenoso, Mr = migajón arcilloso, R = arcilla, Ra = arcilla arenosa, C = franco.

[§] nd = no determinado.

Cuadro 2. Características químicas y mineralógicas de la memoria de los paleosuelos.

Unidad	Horizonte	CO [†] %	pH NaF 1:50	Al ₂ O ₃ +1/2Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Fe ₂	Vidrio volcánico %	Mineralogía de la fracción arcilla [‡]		
							Ha 7 Å	Ha 10 Å	Ka
PT0	A	n.d. [§]	9.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	C								
PT1	Bw	0.24	9.1	0.87	0.3	33.4	X	XX	
	BC	0.29	9.1	0.99	0.47	48.3	XX	X	
PT2	Ah1	2.21	9.4	1.31	0.57	23.7	XX	X	
	Ah2	2.82	9.4	2	0.95	22.7	XX	XX	X
	AB	1.75	9.4	1.49	0.87	24.7	X	X	X
	Ah	2.67	9.4	1.5	0.79	23.7	XX	X	X
	AB	1.59	9.4	1.23	0.64	30.8	XX		X
	Ah	1.44	9.4	1.11	0.47	28.5	XX	XX	
	Bw	0.88	9.4	1.76	0.79	21.7	XX		
	BCg	0.02	9.3	0.74	0.97	34.4	XX		
PT3	Ah	1.75	9.3	0.9	0.63	16.1	XX		X
	AC	1	9.4	0.73	0.37	21.6	XX	X	X
	Ah	2.97	9.4	1.28	0.58	18.1	XX	X	X
	AB	0.98	9.4	1.22	0.51	12.7			
	Bw	0.83	9.4	0.94	0.25	11.6	XX		
	BC	0.25	9.3	0.6	0.19	13.5	XX		
PT4	Ah1	0.21	8.9	0.69	0.75	15.2	X	XX	XX
	Ah2	0.37	9.8	0.52	0.63	19.7	X	XX	XX
	B1	0.21	9.1	0.61	0.6	15.5		XX	X
	B2	0.16	8.7	0.57	0.6	15.4	XX	XX	
	BC	0.03	8.6	0.56	0.68	24.4	XX	X	
	C	0.03	8.5	0.28	0.41	21.8	XX		
PT5	Bt	0.24	8.5	0.3	0.23	6.8	X		XX
	BC	0.24	8.4	0.36	0.21	17.5	X		XX
PT6	E	0.02	7.9	0.21	0.25	4.4			XX
	Bt1	0.02	8.3	0.3	0.18	10.5	X		XX
	Bt2	0.02	8.5	0.28	0.29	15.5	X		XX
	Bt3	0.05	8.5	0.33	0.29	9	X		XX
	BC	0.02	8.6	0.3	0.23	11	XX		XX
	C	0.03	8.5	0.29	0.32	8	XX		XX
PT7	E	0.03	7.9	0.22	0.29	14.6	XX		XX
	Bt1	0.03	8.1	0.44	0.4	16	XX		XX
	Bt2	0.05	8.2	0.49	0.31	16.5	XX		XX
	BC	0.03	8.1	0.28	0.23	16.1	XX		XX
	C	0.02	7.9	0.23	0.15	6.3	XX	XX	

[†] CO = carbono orgánico; [‡] Ha = haloisita; Ka = caolinita. [§] n.d. = no determinado.

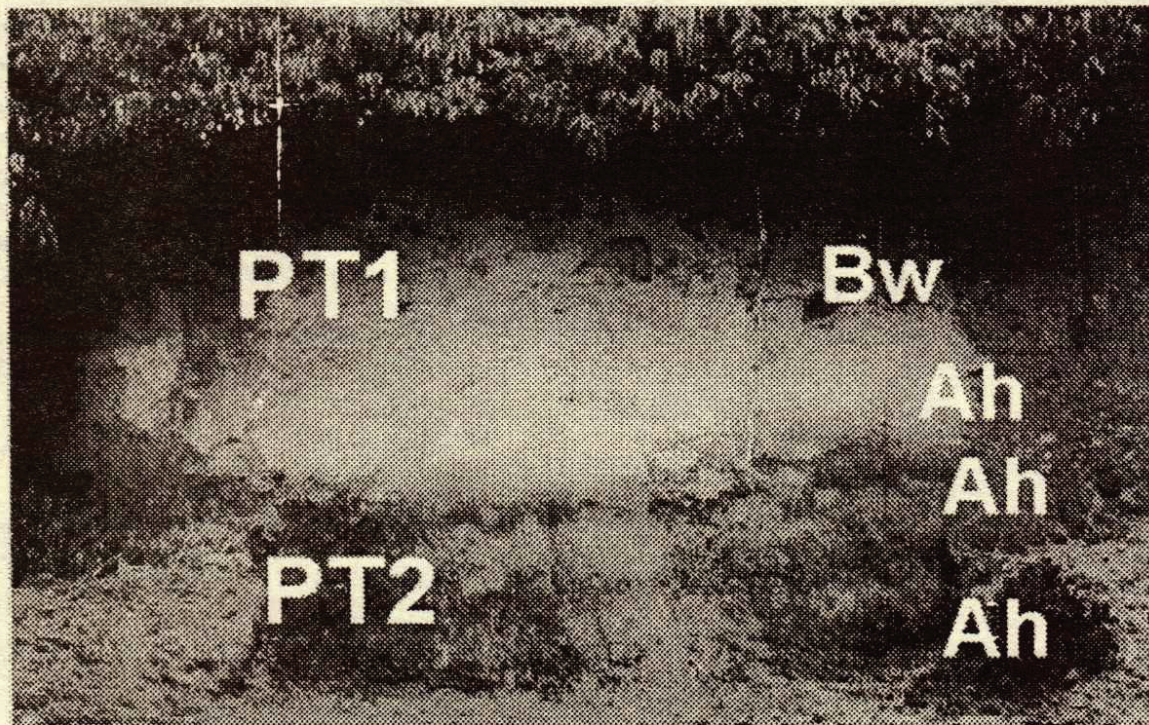


Figura 3. Pedocomplejo del paleosuelo PT2.

un evidente empobrecimiento de humus, el cual se acumula preferentemente cerca de los poros. También es común observar, en PT2 y PT3, revestimientos arcillosos delgados, en su mayoría no laminados, isotrópicos y de color amarillento pardo sobre algunos canales (Figura 4c). En PT4, se reconocieron algunos revestimientos de arcilla, tanto en el horizonte A, como en el horizonte B. Se estima que estos revestimientos son producto de translocación.

Respecto a las características micromorfológicas que presentan los horizontes B de los paleosuelos estudiados, destacan: 1) La microestructura del horizonte Bw de PT1 es compleja en su arreglo. Esto, debido a que presenta agregados granulares asociados con bloques subangulares. El material fino que ocupa el espacio entre estos agregados es isotrópico, de color pardo claro y consiste de arcilla y óxidos de hierro. En este horizonte, los revestimientos de arcilla iluvial son muy escasos (< 1%) delgados y sólo se localizaron en poros. 2) En los horizontes BC y C, se observaron numerosos fragmentos de andesitas con textura porfirítica, constituidos principalmente por plagioclasas, hornblendas, piroxenos y vidrio volcánico. Además, se identificaron en ellos evidencias claras de intemperismo, como son el agrietamiento en la superficie de los minerales primarios, su relleno con arcilla y con óxidos

de hierro. 3) Con respecto a los horizontes Bt, presentes en las unidades PT5, PT6 y PT7, resulta distintiva la abundancia de revestimientos gruesos de arcilla iluvial (> 10% del área de la lámina) y rellenos, muchos de ellos microlaminados (Figura 4d). Estos revestimientos son indicativos de múltiples eventos de iluviación de arcilla, la cual consiste principalmente de minerales cristalinos 1:1. Esto último fue evidenciado por el anisotropismo que presentan bajo polarizadores cruzados. También son frecuentes los revestimientos arcillosos fragmentados, lo cual, según señalaron Sedov *et al.* (2003b), es típico en un horizonte paleo-argílico sometido a efectos de pedoturbación.

Cabe destacar que, en estos horizontes, son abundantes los moteados de hierro y manganeso, los cuales se concentran sobre la superficie de los agregados, poros y canales de raíces. Estas estructuras son rasgos oximórficos que reflejan condiciones alternantes de humedad y sequía. De modo particular, se observó que, en el horizonte Bt de PT7, la masa basal del suelo forma agregados granulares delimitados por revestimientos arcillosos (Figura 4e) y, además, presenta numerosos fitolitos (Figura 4f). Esto último no es común encontrarlo en una zona iluvial de un horizonte árgico. Normalmente, el ópalo biogénico decrece debajo del horizonte eluvial (Sedov *et al.*, 2003b). De acuerdo con Vallejo-Gómez

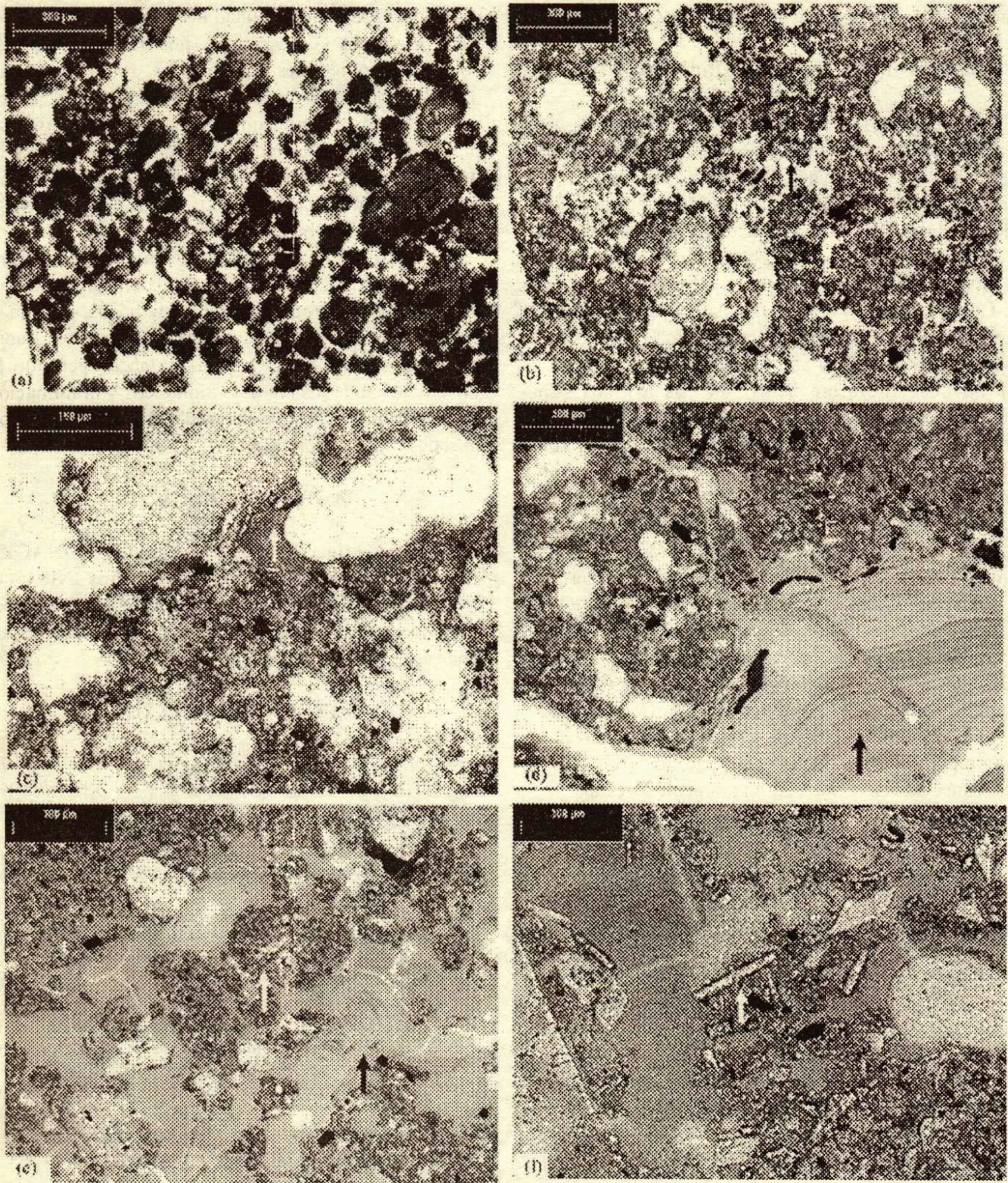


Figura 4. Micromorfología de los suelos estudiados.

(2002), los fitolitos presentes corresponden a plantas C3 (formas crenadas, de quilla, piramidales y cónicos) indicadoras de pedogénesis húmeda (Figura 4f).

Clasificación de los Perfiles Estudiados

Los paleosuelos en PT0, PT2, PT3 y PT4, se caracterizan por presentar, en su perfil, un contenido de vidrio volcánico mayor que 10%, una suma del $\text{Al} + 1/2\text{Feo}$ mayor que 0.4% (Cuadros 1 y 2). De acuerdo con WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999), estos horizontes reúnen las características de un vítrico, el cual es diagnóstico del Grupo de Andosoles.

Con respecto a PT1, éste se caracteriza por presentar un horizonte B arcilloso que muestra escasos rasgos de iluviación de arcilla. Esta característica, sugiere que no debe incluirse dentro de los árgicos. En consecuencia, se optó por considerarlo como un B cámbico. Es importante destacar que, de acuerdo con Velde (1995), la ausencia de amorfos alofánicos, en un suelo de origen volcánico, así como la presencia de arcillas haloisíticas en cantidad significativa, pueden, en muchos casos, representar una condición de baja humedad que coadyuva a la cristalización de los amorfos.

Los paleosuelos más antiguos (PT5, PT6 y PT7) exhiben horizontes B árgicos iluviales bien desarrollados y ricos en rasgos pedológicos. Estos horizontes, según USDA (1988), son indicativos de superficies estables, donde el periodo de estabilidad fue suficiente para desarrollar un equilibrio entre la formación y descomposición de la materia orgánica, fenómeno frecuentemente asociado con un ambiente forestal.

CONCLUSIONES

- El área de estudio se caracterizó durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno por una dinámica que comprendió periodos de inestabilidad de paisaje y periodos de estabilidad. Cada paleosuelo representa un ciclo dinámico de estabilidad del paisaje y pedogénesis, en tanto que cada capa geológica atestigua un periodo de inestabilidad. El conjunto de paleosuelos presentes en la columna pedostratigráfica conserva una memoria multitemporal de estos eventos.

- El grado de desarrollo pedológico y la duración de cada ciclo coadyuvaron a la reconstrucción paleoambiental. De acuerdo con la memoria de estos paleosuelos, los ciclos de estabilidad cortos están caracterizados por la formación de pedocomplejos con horizontes vítricos,

los de duración moderada por horizontes B cámbico, en tanto que la presencia de horizontes árgicos es indicativa de ciclos largos de estabilidad del paisaje.

- Por otra parte, la presencia de horizontes árgicos, así como de propiedades oximórficas, también denota periodos con mayor humedad que el actual, ya que en ningún suelo moderno que se localiza en el área se presentan estos horizontes. La unidad PT4 establece el límite entre los ciclos largos y húmedos que le anteceden cronológicamente y los ciclos de duración corta o moderada, menos húmeda, que le preceden.

- En el caso de PT1, éste representa una de las fases finales del Último Máximo Glacial y también uno de los periodos más secos de los ciclos estudiados, pero en el cual se conservó un ambiente forestal, según el estudio de fitolitos. Esta deficiencia de humedad permitió la cristalización de los amorfos alofánicos y la formación en cantidad significativa de arcillas cristalinas 1:1 con excepción de la caolinita.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por CONACYT (proyecto 32337-T) y DGAPA (proyectos INI04600, IN112205). A la Dra. E. Vallejo y a la M. en C. Kumiko Shimada por su valiosa ayuda en la elaboración de los análisis.

LITERATURA CITADA

- Arce, J. L., J. L. Macías y L. Vázquez-Selem. 2003. The 10.5 Ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: stratigraphy and hazard implications. *Geol. Soc. Am. Bull.* 115: 230-248.
- Bloomfield, K. y S. Valastro. 1974. Late Pleistocene eruptive history of Nevado de Toluca volcano, Central Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 85: 901-906.
- Caballero, M., J. L. Macías, S. Lozano-García, J. Urrutia-Fucugauchi y R. Castañeda-Bernal. 2001. Late Pleistocene-Holocene volcanic stratigraphy and paleoenvironments of the upper Lerma basin, Mexico pp. 247-261. *In: Special Publication 30. International Association of Sedimentologists. Oxford, UK.*
- FAO-ISRIC-SICS (Food and Agriculture Organization-International Soil Reference and Information Centre-Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo). 1999. World Reference Base (WRB). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Boletín 84. Roma, Italy.
- Fieldes, M. y K. W. Perrott. 1966. The nature of allophane soils: 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *N. Z. J. Sci.* 9: 623-629.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.

- García, R. A. y J. J. Muñoz. 2002. El paisaje en el ámbito de la Geografía III.2. Temas selectos de geografía de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- García-Palomo, A., J. L. Macías, J. L. Arce, L. Capra, V. H. Garduño y J. M. Espíndola. 2002. Geology of Nevado de Toluca volcano and surrounding areas, central Mexico. Map Series, MCH089. Geological Society of America. Boulder, CO, USA.
- Jasso-Castañeda, C., S. Sedov, E. Solleiro-Rebolledo y J. E. Gama-Castro. 2002. El desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México. pp. 20-35. *In*: Investigaciones Geográficas. Boletín 47. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Macías, J. L., A. García-Palomo, J. L. Arce, C. Siebe, J. M. Espíndola, J. C. Komorowski y K. Scott. 1997. Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlán volcanoes, Central Mexico". *Bringham Young University, Geology Studies* 42: 493-528.
- 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 Clay Miner.* 7: 317-327.
- Munsell. 1975. Soil Color Charts. Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. Baltimore, MD, USA.
- Parfitt, R. L. 1989. Optimum conditions for extraction of Al, Fe, and Si from soils with acid oxalate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20: 801-816.
- Sedov, S., E. Solleiro-Rebolledo, J. E. Gama-Castro, E. Vallejo-Gómez y A. González-Velázquez. 2001. Buried paleosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in central Mexico. *J. Quaternary Sci.* 16: 375-389.
- Sedov, S., E. Solleiro-Rebolledo, P. Morales-Puente, A. Arias-Herrera, E. Vallejo-Gómez y C. Jasso-Castañeda. 2003a. Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca/central Mexico as indicators of paleoenvironments and soil evolution. *Quaternary Int.* 106-107: 169-184.
- Sedov, S., E. Solleiro-Rebolledo y J. E. Gama-Castro. 2003b. Andosol to Luvisol evolution in central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena* 54: 495-513.
- Shoji, S., M. Nanzyo y R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils. Genesis properties and utilization. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Solleiro-Rebolledo, E., J. L. Macías, J. E. Gama-Castro, S. Sedov y L. D. Sulzerzhitsky 2004. Quaternary pedostratigraphy of the Nevado de Toluca volcano. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 21: 101-109.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1988. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1990. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42. National Resources Conservation Services, Natural Soil Survey Center. Washington, DC, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1992. Soil Survey Manual. Agriculture Handbook 18. Soil Survey Division Staff. Washington, DC, USA.
- Vallejo-Gómez, E. 2002. Morfología e intemperismo de fitolitos, en suelos modernos y paleosuelos de la parte Central del Eje Neovolcánico. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Velde, B. 1995. Origin and mineralogy of clays. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg, Germany.