

El desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México

Carolina Jasso*
Sergey Sedov**
Elizabeth Solleiro**
Jorge Gama**

Recibido: 24 de agosto de 2001
Aceptado en versión final: 22 de febrero de 2002

Resumen. Este estudio, en una primera aproximación, muestra que las características del suelo y de los subsistemas que integran al paisaje, pueden aportar conocimientos sobre los ecosistemas del pasado y su distribución espacial. Por lo tanto, también pueden ser utilizados como indicadores de períodos de estabilidad del paisaje, cortos o largos. Esta aplicación se basa en la evaluación del tiempo de formación de una determinada propiedad diagnóstica del suelo en diferentes intervalos.

Este artículo presenta un análisis de paleosuelos pleistocénicos del Nevado de Toluca con el fin de identificar los diferentes períodos de estabilidad volcánica a través de diversos índices obtenidos a partir de propiedades seleccionadas. Los resultados encontrados indican tres tipos básicos de pedogénesis: *i)* ciclos cortos en que sólo se formaron algunos horizontes Ah y AB evidenciando varios eventos volcánicos sucesivos en un lapso de 1 000-2 000 años y, en consecuencia, mayor inestabilidad; *ii)* ciclos moderados que permitieron la formación de andosoles y *iii)* ciclos prolongados en los cuales se formaron suelos con perfiles Ah/E/Bt/C, aún cuando se encuentran decapitados. El tiempo inferido de su formación comprende hasta 10 000 años, indicando períodos significativos de estabilidad donde la actividad volcánica fue menor.

Palabras clave: Paleosuelos, estabilidad del paisaje, pedogénesis.

Paleosol development as an index of landscape stability. An example from Central Mexico

This study, in a first approximation, shows that the characteristics of soil and subsystems comprising landscape may provide knowledge on past ecosystems and their spatial distribution. Therefore, they may also be used as indicators of short or long landscape stability periods. This application is based on the assessment of the time taken for the formation of a given soil diagnostic property at various temporal scales.

This article presents an analysis of Pleistocene paleosols of the Nevado de Toluca volcano, aimed at identifying the different periods of volcanic stability through several indices obtained from the properties chosen. Findings indicate three basic pedogenesis types: *i)* short cycles in which only some Ah and AB horizons were formed, as evidences of several successive volcanic events that occurred along a period of 1000 - 2000 years and, consequently, of a greater instability; *ii)* moderate cycles which allowed the formation of Andosols and *iii)* prolonged cycles in which soils with Ah/E/Bt/C profiles were formed, although they are currently beheaded. The estimated time that elapsed since its formation comprises 10 000 years, indicating significant stability periods where volcanic activity dropped.

Key words: Paleosols, landscape stability, pedogenesis.

INTRODUCCIÓN

El paisaje, de acuerdo con Birkeland (1984), Pedraza (1996), Thomas (2001) y García (2001), entre otros, es un sistema natural

constituido a su vez por subsistemas de naturaleza geológica, geomorfológica, climática, edáfica y por organismos. La interacción entre estos subsistemas a través del tiempo normalmente tiende a mantener en el paisaje

*Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.
E-mail: carolina@geologia.unam.mx

**Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.
E-mail: solleiro@geologia.unam.mx

una dinámica de equilibrio metaestable mediante el intercambio de materia y energía.

Sin embargo, dicho equilibrio puede ser roto por la eventual acción de fenómenos naturales. Por ejemplo, durante un evento catastrófico como es el caso de una erupción volcánica (Seymour *et al.*, 1989), los materiales emitidos, al adicionarse al paisaje, pueden influir en diferentes grados sobre el equilibrio dinámico de sus subsistemas. Esto, según Thomas (2001), de modo frecuente, provoca la ruptura de su esquema de funcionamiento termodinámico, lo cual, en consecuencia, aumenta la probabilidad de inestabilidad de todo el ecosistema.

A partir de ese momento, los procesos exógenos, como la erosión y la acumulación, también experimentan cambios dinámicos. Lo anterior debido, entre otras causas, a la formación, de nuevas pendientes, drenajes y geoformas, así como a diferencias en la consolidación de los materiales recientemente acumulados (Ruhe, 1969). Todo ello ocasiona, a su vez, procesos degradativos del paisaje (Lugo, 1991).

El relieve, suelo y vegetación son los indicadores ecológicos que reaccionan de forma más inmediata a estos nuevos cambios en flujos de materia y energía. Dichos cambios siempre alteran, en menor o mayor grado, su morfodinámica y evolución, llegando en ocasiones a destruirlos total o parcialmente (García, 2001).

Sin embargo, desde un punto de vista edafológico, estos eventos catastróficos, de modo particular el vulcanismo, también son potencialmente el punto de partida de la formación de un nuevo suelo, o al menos, de nuevos horizontes del suelo (Tiempo Cero) dentro de una columna pedostratigráfica (Miehlich, 1991). Estos suelos y horizontes se forman entre cada período de estabilidad volcánica, de duración variable. Esa periodicidad y variabilidad de los eventos volcánicos genera

en el paisaje una sucesión estratigráfica de suelos con diferentes grados de desarrollo.

Con base en lo anterior, los estudios paleoedafológicos que actualmente se realizan en la Faja Volcánica Transmexicana (Solleiro *et al.*, 1999 y Sedov *et al.*, 2001) señalan que los paleosuelos resultan un apoyo valioso para reconocer los diferentes períodos de estabilidad e inestabilidad del paisaje (Solleiro *et al.*, 2000). Este reconocimiento se basa en el análisis cualitativo y cuantitativo de los tipos de suelos y horizontes que se formaron, de los procesos que tuvieron lugar, así como del grado de evolución que alcanzaron.

En este artículo se pretende vincular a diversos pedocomplejos de paleosuelos volcánicos de edad Pleistoceno Tardío-Holoceno, ubicados en las proximidades del Nevado de Toluca, con los diferentes ciclos de estabilidad-inestabilidad del paisaje que se sucedieron durante ambos períodos geológicos por efecto del vulcanismo. Para lograr esto, se plantearon los siguientes objetivos: *i*) analizar y discutir la secuencia estratigráfica y cronológica de los paleosuelos presentes en esa área de estudio, *ii*) evaluar de modo cuantitativo y cualitativo, mediante el empleo de índices pedológicos, el grado de intemperismo y desarrollo alcanzado por los paleosuelos en esta secuencia y *iii*) aplicar e interpretar los resultados obtenidos de dichas evaluaciones para definir, en una primera aproximación, los diferentes intervalos de estabilidad-inestabilidad del paisaje.

ÁREA EN ESTUDIO

Ambiente físico

Fueron estudiadas dos localidades del Estado de México: Arroyo la Ciervita y Zacango (Figura 1). El clima en ambas localidades es templado húmedo, con una temperatura media anual que oscila entre 4 y 12° C y una precipitación media anual de 1 100 mm

(García, 1988). La vegetación actual, aunque muy alterada por la acción antrópica, incluye pinos (*Pinus sp.*, *P. harwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. moctezumae*), oyameles (*Abies religiosa*), ailes (*Alnus acuminata*), cedros (*Cupressus lindley*), encinos (*Quercus barvinervis*) y algunos pastos (*Festuca tolucensis*, *F. hepraestophila* y *Calamagrostis tolucensis*; Rzedowsky, 1978; Sandoval, 1987).

Las unidades litoestratigráficas presentes en estas áreas, según Macías y colaboradores (1997), son principalmente flujos de piroclásticos del Cuaternario, representados por (1) Pómez Toluca Superior (PTS), (2) Pómez Toluca Inferior (PTI), (3) Flujos de ceniza y bloques grises (FCBG) y (4) Flujos de Pómez de color rosa (FPR). De acuerdo con la clasificación geomorfológica propuesta por Aceves (1996), ambas áreas constituyen parte de las laderas de flujos piroclásticos del Volcán Nevado de Toluca. En estas lade-

ras los suelos modernos que predominan son andosoles ócricos y mólicos, aambisoles ándicos y eutrícos, así como algunos phaeozems con propiedades ándicas y regosoles téfricos. Actualmente, la deforestación y la erosión en estas áreas es severa y tiende a incrementarse por las actividades antropogénicas (agricultura y sobrepastoreo). El principal cultivo en la zona es el de maíz de temporal.

Caracterización de las secciones estratigráficas

Se estudiaron dos localidades (Arroyo la Ciervita y Zacango) ampliamente descritas desde el punto de vista lito y pedoestratigráfico (Macías *et al.*, 1997; Sedov *et al.*, 2001; Solleiro *et al.*, 2002). Estos autores consideran que ambas localidades son las que representan un registro completo de los diferentes eventos que han tenido lugar en los últimos 100 000 años.

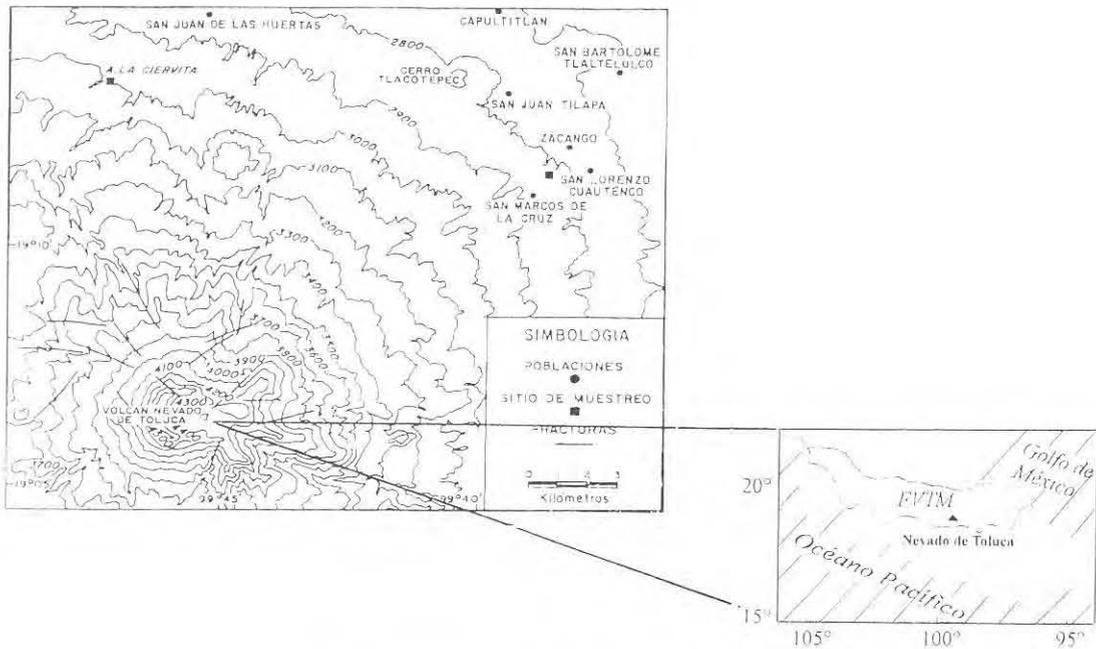


Figura 1. Localización del área en estudio.

A. Arroyo la Ciervita

En Arroyo la Ciervita (A.C.), fueron descritas por Sedov *et al.*, (2001) tres secciones estratigráficas denominadas A.C.1., A.C.2 y A.C.3. Como se observa en la Figura 2, en la superficie de estas secciones se encuentran suelos modernos que sobreyacen a tres paleosuelos, denominados por sus características pedocomplejos. Este término, según Smolikova (1967), se aplica a aquellos perfiles constituidos por dos o más paleosuelos, superpuestos de manera vertical, cuyas características han evolucionado conjuntamente, de tal forma que su historia genética se ha superpuesto.

B. Zacango

Con respecto a la localidad de Zacango existen dos secciones estratigráficas denominadas Z.1 y Z.2 (Figura 2). En ellas está representada toda la secuencia de paleosuelos que se han identificado actualmente en las áreas de estudio. Como puede observarse en la Figura 2, en estas secciones es posible reconocer los tres pedocomplejos encontrados en Arroyo la Ciervita (PT1, PT2 y PT3), que están sobreyaciendo a otros cuatro, lo que constituye un total de siete pedocomplejos, designados como PT1- PT7. Además, se consideró un suelo moderno bajo un ecosistema forestal a 4 000 m de altura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos utilizados se describen a continuación:

1. Secciones estratigráficas. Se estudiaron cinco secciones estratigráficas, tres en Arroyo la Ciervita y dos en Zacango (Figura 2), ambas localizadas en canteras, en el flanco norte del volcán. Arroyo la Ciervita se encuentra a una altitud de 3 015 m en una ladera de 3.8° de pendiente. Por su parte, Zacango está a 2 840 msnm, sobre una

ladera de 3.6°.

Caracterización, clasificación y muestreo. Para ello se emplearon los criterios pedogenéticos establecidos por el *Soil Survey Staff* (1998) y Retallack (1990). La clasificación de los paleosuelos fue hecha con base en la WRB (1998), utilizando correlaciones con suelos modernos análogos.

Levantamiento de campo. Se realizó un levantamiento geológico, de reconocimiento, con el propósito de definir los materiales parentales de los paleosuelos y suelos modernos en donde: (1) se observó la variabilidad espacial de los diferentes materiales volcánicos en el relieve con respecto a su continuidad, espesor y posición estratigráfica y (2) se interpretaron los procesos erosivos, acumulativos y tectónicos.

2. Empleo de índices pedológicos para estimar el grado de intemperismo y desarrollo de los paleosuelos, así como la estabilidad del paisaje. Para la realización de esta etapa, fueron utilizados diversos datos generados por Sedov y colaboradores (2001, 2002) sobre las propiedades diagnósticas de los paleosuelos presentes en las secciones de Arroyo la Ciervita y Zacango. Entre estos datos se consideraron los siguientes: análisis granulométrico realizado por el método de pipeta; análisis mineralógico bajo el microscopio petrográfico para determinar los porcentajes de vidrio volcánico presentes; análisis por difracción de rayos X para estimar la composición mineralógica de los suelos; y análisis selectivos para la determinación de amorfos de hierro. Estos resultados permitieron determinar los siguientes índices:

Índice de desarrollo relativo del perfil (Bilzi y Ciolkosz 1977). Sólo se cuantificó este índice en el suelo moderno, PT4 y PT6, debido a que son los suelos que presentan una horizontalización casi completa en su perfil, lo cual es un requisito para su uso. Dicho

índice resulta útil para estimar, a través de observaciones de algunas propiedades del suelo (color, textura, estructura, consistencia, películas y límites entre horizontes), que son indicativas del grado de desarrollo relativo del perfil (DRP) y, de forma indirecta, según Birkeland (1984), de la duración de la estabilidad del paisaje. Birkeland (1984) considera que el espesor de los horizontes también debe ser tomado en cuenta para normalizar dicha evaluación (DRPn)

Porcentaje de arcilla en el suelo. Se basa en que los porcentajes de arcilla, iluviada y neoformada presente en el suelo, reflejan el efecto del intemperismo a través del tiempo, así como las condiciones ambientales que existieron durante la formación del suelo. Este índice también ha sido considerado por diferentes autores (Wilding *et al.*, 1983; Seymour 1989; Birkeland, 1984) como un medio confiable para evaluar, además, el grado de desarrollo de un suelo e indirectamente, la estabilidad del paisaje.

Índice de la relación limo/arcilla. Se basa en el supuesto de que la fracción de limo del suelo consiste principalmente de minerales intemperizables y que la fracción de arcilla representa el material secundario derivado del intemperismo del limo. En esta relación se considera como valores críticos a < 0.15 y > 2.0 . El primer valor caracteriza a suelos altamente intemperizados, bien desarrollados y generalmente muy antiguos, formados bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje. En contraste, los valores > 2 , generalmente son indicativos de un reducido intemperismo y una escasa evolución del suelo (Young, 1976; Van Wambeke, 1991).

Índice de la relación hierro extraído por oxalato (Feo)/hierro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed). Los valores obtenidos al calcular este índice indican tanto el grado de intemperismo de los minerales primarios presentes en los suelos, como las condiciones ambientales de sitio en las que

se produjo (Shoji *et al.*, 1993). Los valores altos de la relación Feo/Fed según Malucelli *et al.* (1999) representan una baja cristalinidad de los compuestos de hierro, consecuentemente un porcentaje alto de amorfos lo cual es diagnóstico para suelos que no han alcanzado una madurez evolutiva.

Porcentaje de vidrio volcánico en el perfil. Según Shoji *et al.* (1993) los porcentajes altos de vidrio volcánico, de modo frecuente, pueden indicar una relativa juventud del suelo y un intemperismo reducido.

3. Fechamientos por Carbono 14. Con el propósito de estimar dentro del contexto tiempo, el grado de intemperismo y evolución alcanzado por los paleosuelos durante los diferentes períodos de estabilidad del paisaje, se usaron los siguientes fechamientos no calibrados, de ^{14}C ya publicados: a) los obtenidos por Sedov *et al.* (2001) en humus de paleosuelos; b) los clásicos de Bloomfield y Valastro (1974) para las unidades litoestratigráficas Pómez Toluca Superior y Pómez Toluca Inferior, con base en humus de paleosuelos; c) los resultados de Macías *et al.* (1997) obtenidos a partir de fragmentos de carbón incluido en los materiales volcánicos.

RESULTADOS

Secuencia estratigráfica y cronológica de los paleosuelos del área en estudio

Dentro de las localidades estudiadas se han reconocido dos secuencias estratigráficas de paleosuelos (Figura 2) con edades que oscilan del Pleistoceno tardío al Holoceno (Sedov *et al.*, 2001). Se estimó que sus diferencias morfogénicas están directamente relacionadas con la duración de los períodos de estabilidad del paisaje, así como con el tipo, intensidad y duración de los factores ambientales y procesos formadores que predominaron durante su pedogénesis.

La primera secuencia estratigráfica y la más joven (< 50 000 años) está representada por andosoles y cambisoles que, bajo el criterio del *Soil Survey Staff* (1998), se consideran suelos moderadamente evolucionados. Mientras que la segunda secuencia, más antigua (> 50 000 – 100 000 años), la representan luvisoles, los cuales se consideran suelos evolucionados que se formaron en periodos más prolongados, bajo condiciones de mayor estabilidad de paisaje (*Soil Survey Staff*, 1998).

En las tres secciones estudiadas de Arroyo la Ciervita (A.C.; Figura 2), sólo se ha encontrado la secuencia más joven. La sección A.C.1 (Figura 2) presenta en la superficie un suelo moderno que se clasifica como andosol háplico, de acuerdo con la *World Reference Base* (1998). A este suelo le subyacen dos pedocomplejos, el PT1 y el PT2. El primero es un cambisol andico fechado en $3\,435 \pm 50$ años A. P., el cual sobreyace a una capa de cenizas grises y a su vez se encuentra sepultado por un depósito de pómez, fechado en $3\,435 \pm 50$ años A. P. por Macías *et al.*, (1997). Subyaciendo a la capa de cenizas se encuentra PT2 que es un andosol mólico desarrollado a partir de los materiales correspondientes a un depósito de flujos de ceniza y bloques grises (FCBG). Este material ha sido fechado en $28\,140 \pm 875$ años A. P. por Macías *et al.* (1997). Este mismo andosol está representado en la sección A.C.2 (Figura 2), pero con algunas diferencias morfológicas.

Así, en la sección A.C.1 se muestran dos horizontes Ah, mientras que en A.C.2 se tienen tres horizontes Ah.

En la sección A.C.3 sólo está el PT3 (Figura 2), el cual también se clasifica como un andosol mólico y se caracteriza por tener dos horizontes Ah. Subyace a los depósitos de flujos de ceniza y bloques grises (FCBG) y sobreyace a un depósito de pómez de color rosa (Figura 2). La edad reportada por ¹⁴C

para el horizonte Ah (inferior) de este pedocomplejo, es de 35 650 años (Sedov *et al.*, 2001).

Por otra parte, en la sección Z.1 (Figura 2) aflora la Pómez Toluca Superior, fechada en $10\,445 \pm 95$ años A. P. (Arce *et al.*, 2002). Subyaciendo a esta pómez se encuentra PT1a, una unidad similar a PT1, reconocida en Arroyo la Ciervita. Sin embargo, como PT1 no cuenta con un horizonte Ah ni con la suficiente materia orgánica para ser fechado, no ha sido posible establecer la correlación absoluta entre ambas unidades.

Como puede observarse en la Figura 2, bajo PT1a se encuentra la Pómez Toluca Inferior, fechada en $24\,260 \pm 270$ años A. P. (Bloomfield y Valastro, 1977). En esta misma figura se puede observar que PT2 y PT3 subyacen a este depósito. Las edades de ambos pedocomplejos se determinaron en $31\,300 \pm 900$ años A. P. y $39\,600 \pm 1\,000$ años A. P., respectivamente (Sedov *et al.*, 2001).

En esta sección se encuentra además otro pedocomplejo denominado PT4 (Figura 2), el cual también se clasifica como andosol mólico, desarrollado a partir del intemperismo de flujos de lodo y depósitos de lahar y cuya edad es mayor que $42\,030 + 350/-2\,445$ años A. P., ya que subyace al Flujo de Pómez de color rosa (FPR; Macías *et al.*, 1997).

Por otra parte, en la sección Z.2 (Figura 2) fue encontrada una secuencia de tres pedocomplejos denominados PT5-PT7, los cuales fueron clasificados como luvisoles. La edad de estos paleosuelos no se sabe con certeza, pero Sedov *et al.* (2001) estiman que de acuerdo con el grado de desarrollo que muestran, es posible suponer que el período de formación para cada pedocomplejo es mayor que 10 000 años (Birkeland, 1984; *Soil Survey Staff*, 1998).

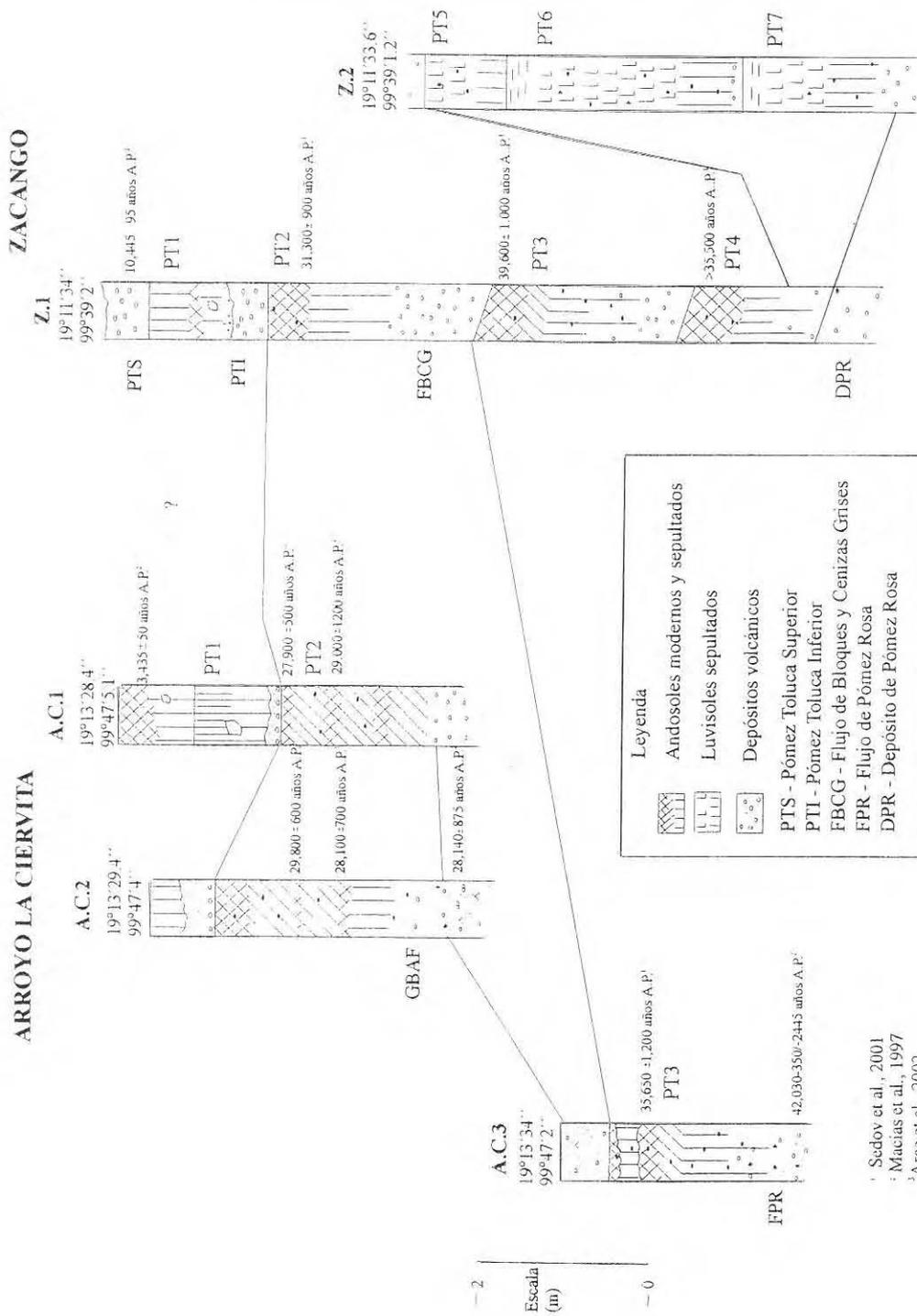


Figura 2. Secuencia estratigráfica y cronológica de los paleosuelos del área en estudio. A través del paisaje se observan diferentes eventos volcánicos, los cuales no están representados de manera continua sobre el relieve y, además, no mantienen el mismo espesor. A su vez, los suelos muestran variabilidad espacial.

Índices Pedológicos

Índice de desarrollo relativo del perfil (DRP) de Bilzi y Ciolkosz (1977). La Tabla 1 muestra los valores de desarrollo relativo (DRP) de los perfiles seleccionados y sus valores normalizados (DRPn) con base en los criterios de Birkeland (1984).

Como se observa en esta tabla, el suelo moderno muestra los valores de DRP y DRPn más bajos y en orden progresivo, le siguen PT4 y PT6. Sin embargo, estos valores están subestimados en el caso de PT6, ya que carece de un horizonte A, el cual fue erosionado y no se ha encontrado un perfil completo que permita su evaluación real. Por su parte PT4 muestra en su superficie, que el horizonte Ah en los primeros 8 cm está retrabajado con material volcánico, por lo que esta porción no fue considerada para su evaluación.

Porcentaje de arcilla. Los porcentajes de arcilla determinados para los diferentes suelos estudiados se muestran en la Tabla 2, observándose una variación moderada en los porcentajes de arcilla. El mayor contenido

de arcilla se observó en PT6, en tanto que los menores porcentajes se presentaron en el suelo moderno. Los demás suelos mostraron porcentajes moderados que pueden considerarse, según Buol *et al.* (1988), como normales para suelos de zonas templadas. Sin embargo, se detectaron incrementos sustanciales en los horizontes B (Bt y Bw) en todos los paleosuelos, con respecto al material parental. En ocasiones se encontraron también altos porcentajes en los horizontes de transición como son el AC.

Relación limo/arcilla. Los valores más altos de esta relación fueron encontrados en el suelo moderno del mismo modo que en PT1 y en todos los PT2 y PT3 (Tabla 2). En tanto que, PT4, PT5, PT6 y PT7 se caracterizaron porque presentaron los valores más bajos (Tabla 2). En ningún caso se detectaron valores críticos (0.15) para dicha relación.

Índice de la relación Feo/Fed. Como se observa en la Tabla 2 los valores más altos de este índice fueron identificados, en general, para los horizontes Ah, Bw y BCg. En contraste, los valores más bajos casi siempre correspondieron para los horizontes Bt.

Tabla 1. Desarrollo relativo del perfil de los paleosuelos

	Horizontes	DRP	Espesor (cm)	DRPn
Suelo moderno	Ah/c	29	33	957
	AC/c	29	37	1 073
	Total			2 030
PT4 Z 1	Ah/C	18	8	144
	Ah ₂ /c	27	25	675
	B ₁ /C	29	27	783
	B ₂ /C	23.5	30	705
	BC/C	14.5	30	435
Total			2 742	
PT6 Z.2	E/C	21	30	630
	Bt ₁ /C	23	15	345
	Bt ₂ /C	25	25	625
	Bt ₃ /C	30	110	3 300
	BC/C	26.5	40	1 060
Total			5 960	

DRPn normalizado, multiplicado por el espesor del horizonte.

Tabla 2. Valores obtenidos para los índices pedológicos utilizados

	Horizontes	*Arcilla %	Limo/Arcilla	Feo/Fed	Vidrio %
Suelo	Ah	9 10	1 84	0 33	29 5
Moderno	AC	18 30	0 90	2 25	29 4
	C	4 90	1 09	0 35	33 1
PT1 A.C.1	Bw	38 20	0 39	0 30	33 4
	BC	24 90	1 22	0 47	48 3
	C	7 40	1 13	0 56	53 3
PT2 A.C.1	Ah ₁	23 70	0 92	0 62	
	Ah	25 20	1 26	1 02	n d
	Bw	32 10	0 88	0 95	
	Ah	17 50	1 89	1 09	
	AB	33 30	0 73	0 57	
	B	26 30	1 15	0 45	
	BC	16 10	1 33	0 29	
PT2 A.C.2	Ah ₁	16 70	2 02	0 56	23 70
	Ah ₂	16 20	1 32	0 95	22 70
	AB	24 30	1 55	0 87	24 70
	Ah	26 20	1 58	0 79	23 70
	AB	24 30	1 94	0 64	30 80
	Ah	21 90	1 60	0 47	28 50
	Bw	23 80	0 78	0 79	21 70
	BCg	13 30	0 35	0 97	34 40
PT3 A.C.3	Ah	19 70	1 26	0 63	16 10
	AC	12 90	1 10	0 37	21 60
	Ah	11 30	1 71	0 58	18 10
	AB	15 30	1 34	0 51	12 70
	B	21 20	2 15	0 25	11 60
	BC	19 40	1 95	0 19	13 50
PT2 Z.1	Ah1	20 30	1 30	1 18	
	Ah2	28 70	0 57	1 53	n d
	Bw	27 80	0 83	0 80	
	BC	7 30	4 97	0 94	
	C	2 60	3 03	2 91	
PT3 Z.1	Ah ₁	18 70	1 32	0 69	
	Ah ₂	19 00	1 37	0 87	n d
	AB	24 50	1 00	1 63	
	B	23 90	1 04	1 19	
	B ₂	16 70	1 55	0 92	
	BC	17 60	1 41	0 79	
	C	14 90	1 35	2 13	

Tabla 2. (continúa) valores obtenidos para los índices pedológicos utilizados

	Horizontes	*Arcilla	Limo/Arcilla	Feo/Fed	Vidrio %
PT4 Z 1	Ah	17 60	0 82	0 75	15 20
	Ah ₂	24 80	0 68	0 63	19 70
	B ₁	24 50	0 84	0 60	15 50
	B ₂	17 90	0 87	0 60	15 40
	BC	13 30	0 68	0 68	24 40
	C	12 80	0 50	0 41	21 80
PT5 Z.2	Bt	27 20	1 10	0 23	6 80
	BC	21 40	1 15	0 21	17 50
PT6 Z.2	E	36 50	0 79	0 25	4 40
	Bt ₁	34 10	1 18	0 18	10 50
	Bt ₂	35 90	0 88	0 29	15 50
	BT ₃	40 50	0 89	0 29	9 00
	BC	48 20	1 02	0 23	11 00
	C	14 10	0 80	0 32	8 00
PT7 Z.2	E	27 40	0 79	0 29	14 60
	Bt ₁	32 10	0 90	0 40	16 00
	Bt ₂	27 60	1 29	0 31	16 50
	BC	21 00	0 88	0 23	16 10
	C	11 60	1 07	0 15	6 30

*Los intervalos granulométricos completos se presentan en el trabajo publicado por Sedov *et al.* (2001).

A nivel de tipo de suelo, los andosoles (suelo moderno, PT2, PT3 y PT4) se caracterizaron por presentar los valores más altos de esta relación, en tanto que los luvisoles (PT5, PT6 y PT7) presentaron los valores más bajos (Tabla 2).

Porcentaje de vidrio volcánico. El vidrio volcánico se presentó en cantidades moderadas y en ocasiones altas (>45%) tanto en el suelo moderno, como en PT1 y PT2 (A.C.2; Tabla 2). No obstante, se observa un decremento moderado en PT3 (A.C.3) y PT4, el cual es más significativo en PT5,

PT6 y PT7 (Tabla 2).

DISCUSIÓN

Caracterización de las secciones estratigráficas. Las secciones estratigráficas estudiadas están constituidas en su totalidad por pedocomplejos que, de modo eventual, como en los casos de PT1 (A.C.1) y PT2 (Z.1), llegan a estar sepultados por suelos modernos (Figura 2).

La formación de estos pedocomplejos en el área en estudio, es una evidencia de que, en

varias ocasiones, el impacto causado por los eventos volcánicos y la erosión sobre los suelos preexistentes no fue de una magnitud ni duración suficientes como para destruirlos, aunque sí para modificarlos. Con base en esta dinámica y en los fechamientos de la secuencia de paleosuelos (Sedov *et al.*, 2001) y de los depósitos de materiales (Bloomfield y Valastro, 1974; Macías *et al.*, 1997) es posible identificar diferentes intervalos de duración entre los eventos volcánicos que se presentaron en la zona.

En las secciones estratigráficas se puede observar que los eventos volcánicos se presentaron cíclicamente, tanto en intervalos cortos como prolongados (>10 000 años; Sedov *et al.*, 2001). Durante los períodos de estabilidad entre esos intervalos, siempre se tendió a la formación de un nuevo suelo o de un nuevo horizonte. Generalmente, el desarrollo de varios horizontes Ah en los pedocomplejos (PT2 A.C.1, A.C.2, Z.1; PT3 A.C.3 y Z.1 y PT4 en Z.1) es indicativo de la presencia de periodos de estabilidad cortos entre la formación de cada horizonte. Por el contrario, la presencia de varios horizontes AB, Bw y BC en algunos pedocomplejos (PT2, PT3 y PT4) expresan la posibilidad de períodos más prolongados de estabilidad (Figura 2, Tabla 2). Se considera que los horizontes Bt (PT5, PT6 y PT7, Tabla 3) son siempre representativos de períodos prolongados de estabilidad del paisaje (*Soil Survey Staff*, 1998).

Por otra parte, el hecho de que paleosuelos de diferentes edades presentes en las secciones estratigráficas estudiadas (PT1-PT4 y PT5-PT7), sean siempre similares entre sí (Figura 2), sugiere que los factores formadores del suelo no cambiaron significativamente durante los diferentes intervalos. Este fenómeno ha sido ampliamente reportado por Bronger *et al.* (1998) en paleosuelos derivados de loess que se localizan en Asia Central y recientemente por Sedov *et al.* (2001) y Solleiro *et al.* (2002) en

paleosuelos de origen volcánico.

Procesos y morfología de las secciones estratigráficas. Los pedocomplejos estudiados se caracterizaron morfológicamente por presentar en las secciones estratigráficas: a) suelos con perfiles truncados, b) diferentes espesores efectivos de los suelos, c) pedostratificación diferencial evidenciada por cambios claros a abruptos en color y límite entre horizontes, d) perfiles con repetición de dos o más horizontes Ah, AB y B, y e) ausencia de algunos suelos en la secciones estratigráficas (Tabla 2).

Los puntos 1 y 2, evidentemente son resultado de procesos erosivos que pudieron presentarse tanto en períodos de estabilidad del paisaje, como durante el inicio de los eventos volcánicos. Los puntos 3 y 4 sugieren la presencia de nuevos depósitos volcánicos sobre horizontes o suelos preexistentes, así como la presencia de períodos de estabilidad que les permitieron un grado de evolución.

Por otra parte, la ausencia de ciertas unidades lito o pedostratigráficas, puede explicarse por la dinámica de acumulación-erosión de la zona. De acuerdo con Bloomfield y Valastro (1974) y Macías *et al.*, (1997), los eventos volcánicos fueron diferentes en duración, frecuencia, orientación, naturaleza de los materiales y magnitud. Además, es muy probable que también hayan influido las condiciones físicas del paisaje como son la pendiente, altura y tipo de relieve que caracterizaron la zona en el momento de cada erupción; así como los procesos acumulativos y erosivos presentes durante cada evento volcánico y posterior a ellos.

Índices pedológicos

Índices de desarrollo relativo del perfil. Como se observa en la Tabla 1, todos los valores de DRP son superiores a diez. Bilzi y Ciolkosz (1977) estableció que valores de DRP encontrados iguales o menores a diez

corresponden con suelos poco desarrollados o muy jóvenes o que se encuentran en condiciones de inestabilidad del paisaje (erosión). Así, los valores obtenidos para el suelo moderno son indicativos de un desarrollo aunque moderado, todavía insuficiente para formar un horizonte Bw. En el caso de PT4, su valor de DRP es de 94. En general, se ha encontrado en diversos estudios relacionados al respecto (Solleiro, 1992; Gama, 1996), que los valores de DRP próximos a 100, pero no mayores, son comunes en suelos de zonas templadas con desarrollo moderado, aunque con un período de formación que requiere de una buena estabilidad de paisaje a través del tiempo. En el caso de PT6, los valores son superiores a 100 (Tabla 1), lo que es indicativo de un fuerte desarrollo del suelo y de un mayor período de estabilidad y tiempo para su formación. Es necesario señalar que en condiciones normales PT6 debió tener un valor de DRP superior al estimado, si se considera que no se pudo evaluar el horizonte A de este perfil por estar decapitado.

Los valores de DRPn también corroboran que el suelo moderno es el que menor desarrollo relativo presenta y que éste alcanza su valor máximo en PT6.

Porcentaje de arcilla. Los valores moderados de arcilla obtenidos para el suelo moderno, así como para PT1, PT2, PT3 y PT4 reflejan un moderado intemperismo y una moderada transformación mineral, ambos muy frecuentes en andosoles y suelos con propiedades ándicas de climas templados. Estos suelos, según Shoji *et al.* (1993), requieren para su formación de períodos de estabilidad que pueden oscilar de unos cientos de años (500 años) hasta más de 3 000 años. De acuerdo con Velde (1995) la arcilla que se forma en el perfil de estos suelos, principalmente haloisita (Sedov *et al.*, 2002), frecuentemente es el resultado de la cristalización y evolución de los minerales amorfos que de modo diagnóstico presentan.

Por otra parte, la presencia de horizontes Bw en estos suelos, además de indicar un moderado intemperismo mineral, también sugiere períodos estables que, según Wilding *et al.* (1983), pueden estimarse en más de 1 000 años.

En el caso de los luvisoles, el *Soil Survey Staff* (1998) considera que en su mayoría son suelos con contenidos significativos de arcilla iluvial y neoformada que se formaron durante el Pleistoceno Tardío, en un paisaje muy estable durante un período de tiempo prolongado. Como se ha mencionado, PT5-PT6 y PT7 poseen horizontes argílicos (bt), por lo que se les clasificó en campo como luvisoles, relacionándolos con climas templados bajo ecosistemas forestales (Wilding, 1983).

Sin embargo, solamente PT6 muestra una clara eluviación e iluviación de arcilla en el horizonte Bt (Tabla 2). Por esta característica, se establece que PT6 representa uno de los períodos de mayor estabilidad del paisaje dentro de la columna estratigráfica. En los casos de PT5 y PT7, éstos también muestran un horizonte argílico, pero sólo totalmente evidenciado por los estudios micromorfológicos realizados por Sedov *et al.* (2001). Dichos estudios manifiestan claramente la presencia de arcilla iluvial y películas (argilanes), ambas diagnósticas para un horizonte Bt. Estos rasgos pedogénicos también indican un tiempo prolongado de estabilidad del paisaje, pero probablemente menor al de PT6.

Por otra parte, como se observa en la Tabla 2, existen algunos cambios texturales abruptos (WRB, 1994) evidenciados por los diferentes contenidos de arcilla entre los horizontes. Por ejemplo: entre el horizonte Bw (32.10%), el Ah (17.50%) y el AB (33.30%) del PT2 A.C.1. De acuerdo con WRB (1994), esto sugiere una clara discontinuidad entre dos suelos de edades diferentes e indica, además, un período de inestabilidad durante

la pedogénesis de esos suelos. En este caso, es viable considerar que el horizonte Ah se haya formado por el intemperismo de una capa de ceniza que se depositó sobre un horizonte preexistente (AB) y que posteriormente esa capa (Ah) fuera sepultada por un nuevo depósito que constituyó un suelo con horizonte Bw.

Índice de la relación limo/arcilla. En los pedocomplejos (PT1, PT2, PT3 y PT4), las relaciones limo/arcilla son generalmente mayores a la unidad y sólo en un caso >2 (BC de PT2 Z.1, Tabla 2), De acuerdo con Young (1976), los valores encontrados para estos pedocomplejos representan un valor de intemperismo moderado a bajo de los minerales presentes en los horizontes del suelo. Normalmente, esto sucede en un medio estable, donde los factores ambientales que predominan también son moderadamente agresivos en su dinámica intempérica, como es común en zonas templadas (Wilding, 1983).

En los pedocomplejos (PT5, PT6 y PT7) las relaciones limo/arcilla son menores que la unidad en la mayoría de los casos (Tabla 2). Esto demuestra un mayor grado de intemperismo mineral con respecto a los pedocomplejos anteriores. Sin embargo, debido a que en ningún caso se presentaron valores próximos a 0.15 (Tabla 2), el grado de intemperismo por ellos alcanzado, se debe considerar moderado y propio de zonas templadas, pero con períodos de estabilidad más prolongados que los discutidos. Para PT1, PT2, PT3 y PT4 la mayor estabilidad permitió que los factores de intemperismo actuaran por un mayor tiempo sobre los suelos y, consecuentemente, formaran horizontes argílicos.

Índice de la relación Feo/Fed. En general, los compuestos amorfs de hierro tienden a disminuir e incluso a desaparecer de los suelos con mayor intemperismo, evolución y edad. Esto es debido a que los amorfs,

principalmente del tipo de la ferrihidrita, adquieren diferentes niveles de cristalización (Bohn, 1993). Sin embargo, también pueden llegar a estar ausentes cuando se presentan condiciones del medio, diferentes a las que favorecieron su formación (Schwertmann, 1988).

Los valores altos de esta relación detectados en el suelo moderno, así como PT1, PT2, PT3 y PT4, reflejan una menor cristalización de los materiales del suelo (propiedad ándica WRB, 1994). En estos pedocomplejos el alto contenido de amorfs, de acuerdo con Bigham y Ciolkosz (1993) y Shoji *et al.* (1993), también está relacionado con varias condiciones del sitio que predominaron en el paisaje y en los suelos. Entre ellas: a) la presencia de ecosistemas con vegetación arbórea, característicamente acidificante; b) los porcentajes altos de materia orgánica que presentan los paleosuelos (Sedov *et al.*, 2001), los cuales estabilizaron a los amorfs a través de su actividad electrostática; c) las condiciones redox que prevalecieron en algunos suelos (PT2 de A.C.2 y PT3 de A.C.3), y d) el clima del suelo suficientemente húmedo para impedir su cristalización. El hecho de que tanto el suelo moderno como los pedocomplejos PT1, PT2, PT3 y PT4 muestren contenidos apreciables de estos amorfs, es indicativo de que todos ellos se formaron bajo condiciones ambientales similares, bajo un clima templado. Sin embargo, PT1 muestra un mayor contenido de haloisita (Sedov *et al.*, 2001) que pudiera estar relacionado con un clima más seco que permitió la cristalización de los amorfs de sílice).

Con respecto a los luvisoles (PT5-PT7), los resultados obtenidos indican que: a) los bajos contenidos de amorfs presentes son el resultado de una evolución pedogenética muy prolongada bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje y b) la presencia de estos amorfs sugiere intergradaciones evolutivas entre los andosoles y los luvisoles.

Esto significa que los luvisoles probablemente se formaron por la evolución de los andosoles. Para que esto suceda en condiciones de clima templado, se requiere de períodos prolongados de tiempo y de una alta estabilidad del paisaje.

Porcentajes de vidrio volcánico. Los contenidos de vidrio volcánico encontrados en suelo moderno, PT1 y PT2, señalan que las condiciones medioambientales no favorecieron su total alteración. Además, se considera que hubo aportes constantes de material volcánico que enriquecieron de vidrio a los suelos. Por ejemplo, en los horizontes Ah de PT2 (Tabla 2). En los luvisoles los contenidos de vidrio volcánico son más bajos, indicando un mayor intemperismo y mayor formación de arcilla. Esto es más evidente en PT5 y PT6 (Tabla2). En PT5 la diferencia entre el contenido de vidrio en BC y Bt es de 10%, sin que se observe una discontinuidad entre ambos horizontes, concluyéndose que el porcentaje es más bajo en Bt, porque el vidrio se alteró. En PT6, por su parte, el horizontes E muestra los valores más bajos, indicando que prácticamente todo el vidrio se alteró, formó arcilla y ésta fue eluviada para constituir los horizontes argílicos.

CONCLUSIONES

Los estudios de relación paleosuelos-paisaje fueron una excelente herramienta para determinar no sólo los períodos de estabilidad, sino además, para estimar las edades de diferentes eventos volcánicos que interrumpieron la pedogénesis a través del fechamiento de la materia orgánica contenida en los suelos. Cada horizonte Ah de un suelo, representa diferentes ciclos de formación. Cada ciclo se completa de la siguiente manera: depósito volcánico + pedogénesis + depósito volcánico.

La duración de los períodos de estabilidad del paisaje, por ausencia de la actividad

volcánica, está bien representada en la memoria del suelo u horizontes. Así, en los períodos cortos (1000 - 2000 años), es diagnóstica la formación única de horizontes Ah y AB. En períodos más breves, sólo se constituyeron capas que no fueron transformadas por pedogénesis. En períodos moderados (> 3000 años) resultó típica la formación de suelos con horizonte Bw, en tanto que en períodos de estabilidad prolongada, la formación de suelos con horizontes de acumulación de arcilla (Bt) fue privativa.

La secuencia de los suelos estudiados que se formaron en los últimos 50 000 años, en todos los casos presentaron propiedades diagnósticas para andosoles. Esto sugiere que las características de los factores ambientales durante los diferentes períodos de estabilidad del paisaje fueron muy similares entre sí. Lo mismo puede aplicarse a suelos que se formaron hace más de 50 000 años y cuyas características taxonómicas son similares a las de los luvisoles.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos 32337-T CONACyT e IN104600 de DGAPA por su valioso apoyo. A las maestras A. González, A. Arias y E. Vallejo por su ayuda en la elaboración de los análisis. A la maestra Ana M. Rocha por la revisión del resumen y a los señores Luis Burgos Peralta y Fernando Alberto Vega López por el apoyo en la realización de los dibujos.

REFERENCIAS

- ☐ Aceves Q., J. F. (1996), *Geología y Geomorfología del Volcán Nevado de Toluca*, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, División de Estudios de Posgrado, UNAM, México.
- ☐ Arce, J. L., J. L. Macías y L. Vázquez Selem (2002), "The 10.5KA Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: stratigraphy and hazard implications", *Geological Society of America Bulletin* (en prensa).

- Bigam, J. M. y E. J. Ciolkosz (1993), *Soil color. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication*, no. 31, Madison, Wisconsin, USA.
- Bilzi, A. F. y E. J. Ciolkosz (1977), "A field morphology rating scale for evaluating pedological development", *Soil Sci.*, 124, pp. 45-49.
- Birkeland, P. W. (1984), *Soils and Geomorphology*, Oxford University Press, USA.
- Bloomfield, K. y S. Valastro (1974), "Late Quaternary tephracronology of the Nevado de Toluca, Central Mexico", *Overseas Geology and Mineral Resources*, Institute of Geological Sciences, 46.
- Bloomfield, K. y S. Jr. Valastro (1977), "Later Quaternary tephracronology of the Nevado de Toluca, central Mexico", *Overseas Geology and Mineral Resources*, 46, Institute of Geological Sciences.
- Bohn, H. (1993), *Química del suelo*, Limusa, México.
- Bronger, A., R. Winter y S. Sedov (1998), "Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia", *Catena* 34, pp. 19-34.
- Buol, S. W., F. D. Hole y R. J. McCracken (1988), *Génesis y clasificación de suelos*, Trillas, México.
- Gama, C. J. E. (1996), *Los suelos tropicales de México: génesis, dinámica y degradación*, Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, R. A. (2001), "Evolution of disturbed oak woodlands: the case of Mexico City's western forest reserve", *The Geographical Journal*, vol. 167, no. 1, March, pp. 72-82.
- Lugo, H. J. (1991), *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Macías, J. L., P. A. García 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", *BYU Geology Studies* 42, pp. 493-528.
- Malucelli, F., F. Terribile y C. Colombo (1999), "Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Sao Miguel (Azores)", Number 88 *Geoderma*, Elsevier, The Netherlands, pp. 73-98.
- Miehlich, G. (1991), "Chronosequences of volcanic ash soils", *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* 15.
- Pedraza, G. J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*, Ed. Rueda. Alarcón, Madrid.
- Retallack, G. J. (1990), *Soils of the past. An Introduction to paleopedology*, Unwin Hyman, Inc., USA.
- Ruhe, R.V. (1969), *Quaternary landscapes in Iowa*, Iowa State Univ. Press, Ames.
- Rzedowsky, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México.
- Sandoval, B. A. (1987), *Actualización y análisis cartográfico sobre usos de suelo y vegetación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Schwertmann, U. (1988), "Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments", en Stucki, J. W. et al. (eds.), *Iron in soils and clay minerals*, D. Reidel Publ. Co., Boston, pp. 267-308.
- Sedov, S., R. E. Solleiro, C. J. E. Gama, G. E. Vallejo y V. A. González (2001), "Buried paleosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in central Mexico", *Journal of Quaternary Science*, Number 16 (4), John Wiley & Sons, Ltd, London, pp. 375-389.
- Sedov, S., R. E. Solleiro, P. P. Morales, C. J. E. Gama, G. E. Vallejo y C. Jasso (2002), "Mineral and organic components of the buried paleosols

of the Nevado de Toluca/Central Mexico, as indicators of paleoenvironments and soil evolution", *Quaternary International* (en prensa).

☞ Seymour, D.S., (1989), *Soil. Morphology, genesis, and classification*, John Wiley & Sons, New York.

☞ Shoji, S., M. Nanzyo y R. Dahlgren (1993), *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*, Elsevier, Science Publishers, B. V. Netherlands.

☞ Smolikova, L. (1967), "Polygenese der Fossilen Lossboden der Tschechoslowakei mi Lichte mikromorphologischer Untersuchungen", *Geoderma* 1: 315-324.

☞ Soil Survey Staff (1998), *Keys to soil taxonomy*, 8ª. ed., United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington. D.C.

☞ Solleiro, R. E. (1992), *Estudio sobre alteración, desarrollo y evolución de suelos derivados de rocas basálticas*, tesis de Maestría en Edafología, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

☞ Solleiro, R. E., C. J. E. Gama, M. S. Palacios, S. N. Sedov y S. A. Shoba (1999), "Late Pleistocene Paleosols in Central Mexico: Genesis and Paleogeographic Interpretation", *Eurasian Soil Science*, vol. 32, pp. 1077-1083.

☞ Solleiro, R. E. (2000), "Estudio de paleosuelos como indicadores de estabilidad ambiental: El caso del Nevado de Toluca", póster, *Memorias: Riesgos geológicos y ambientales en la Ciudad de México*, 16-20 de octubre, Torre de Ingeniería, UNAM, México.

☞ Solleiro, E., J. L. Macías, J. Gama Castro, S. Sedov y L. D. Sulerzhitsky (2002a), "Quaternary pedostratigraphy of the Nevado de Toluca volcano", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (en prensa).

☞ Solleiro, E., S. Sedov, J. Gama Castro, D. Flores Román y G. Escamilla Sarabia (2002b), "Paleosol-sedimentary sequences of the Glacis of Buenavista, central Mexico: interaction of the late Quaternary pedogenesis and volcanic sedimentation", *Quaternary International* (en prensa)

☞ Thomas, M. F. (2001), "Landscape sensitivity in time and space an introduction", *Catena* 42, pp. 83-98.

☞ Van Wambeke, A. (1991), *Soils of the Tropics: properties and appraisal*, McGraw Hill, Inc., USA.

☞ Velde, B. (1995). *Origin and mineralogy of clays*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

☞ Wilding, L.P., N. E. Smeck y G. F. Hall (1983), *Pedogenesis and soil Taxonomy. II. The Soil Orders*, Elsevier Science Publishers B.V. Netherlands.

☞ World Reference Base for Soil Resources (WRB; 1994), draft. ISSS. ISRIC and FAO. Wageningen. Rome.

☞ World Reference Base for Soil Resources (WRB; 1998), draft. ISSS. ISRIC and FAO. Wageningen. Rome.

☞ Young, A. (1976), *Tropical soils and soil survey*, Cambridge University Press, Cambridge.