Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
ISSN 0188-4611, Núm. 69, 2009, pp. 7-20

Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México

Recibido: 4 de septiembre de 2007. Aceptado en versión final: 28 de octubre de 2008.

Carlos Alejandro Pérez García*
Jorge López Blanco*
Gilberto Vela Correa**

Resumen. La alteración de las propiedades físicas y químicas en sitios no quemados (SNQ) y quemados (SQ), son dos aspectos importantes para el desarrollo del suelo y vegetación con respecto a tres porciones contrastantes del relieve. Se realizó un muestreo dirigido en suelos de áreas quemadas y no quemadas en una microcuenca, considerando tres posiciones en el relieve: *a)* cauce, *b)* dorso y *c)* superficie cumbral de ladera. Los suelos de las áreas no quemadas fueron tomados a partir de un punto de referencia bajo las mismas condiciones de relieve, por lo que las muestras de suelos no quemados tuvieron un transecto con seis sitios de muestreo, mientras que en los suelos quemados se tuvieron tres transectos con quince sitios de muestreo. Los resultados obtenidos muestran que la densidad aparente (Da) aumentó en la superficie cumbral y el cauce, como producto de la combustión de la materia orgánica en los SQ, en comparación con los SNQ, afectando la estructura del suelo y diminuyendo la porosidad total del suelo. La mayor cantidad de agregados se encontró en el cauce, predominando los micro y mesoagregados. Los suelos presentaron una ligera disminución en el pH en la zona del cauce y superficie cumbral, hubo un incremento en Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}, lo que indica que uno de los efectos del incendio fue liberar los elementos minerales que se vuelven más abundantes y estimulan el crecimiento de las plantas. La CIC disminuyó en la superficie cumbral pero aumentó ligeramente en la ladera y en el cauce atribuible al impacto de la combustión de la MO que aceleró el proceso de mineralización y favoreció el arrastre y depositación de arcillas y complejos húmicos en la ladera y cauce. El fósforo presentó una ligera disminución con respecto a los SNQ, localizándose la mayor cantidad de este nutrimento en el dorso de ladera y el cauce. El cauce y el dorso de ladera fueron las porciones de relieve que presentaron mayores diferencias atribuibles a que la quema tuvo mayor magnitud y duración, provocando mayores alteraciones en las propiedades físicas y químicas, mientras que en la superficie cumbral las diferencias fueron menores, debido a que se consideran sitios más estables.

Palabras clave: Incendios forestales, suelo, relieve, propiedades físicas y químicas, El Pelado, Distrito Federal.

Relief influence on properties of a soil disturbed by a wildfire in El Pelado volcano, Central Mexico

Abstract. The alteration of the physical and chemical soil-properties in non-burnt areas (NBA) and burnt-areas (BA) are two important characteristics for the development of soil and vegetation regarding to the three contrasting slope portions. A soil-sampling with a directed-strategy of burnt and not burned areas in a micro catchment was carried out considering three slope positions in the relief: *a)* Channel stream, *b)* Backslope, and *c)* Summit. The soils from the non-burnt areas were taken starting from a reference point under the same relief conditions, for what the soil samples from non-burnt areas came from a transect with six sampling-sites, while the burnt-soils had three transects with

* Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: geozar@yahoo.com, jlopezblanco@hotmail.com.
** Laboratorio de Edafología, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Coyoacán, 04960, México, D. F. E-mail: gvela@correo.xoc.uam.mx.

fifteen sampling-sites. The results obtained show that the bulk density increased on the summit and the channel-stream as a combustion product of the organic matter (OM) in the BA soils in comparison with the NBA soils, affecting soil structure and diminishing the total soil porosity. The biggest amount of soil aggregates was in the channel stream, prevailing the microaggregates and mesoaggregates. The soils have shown a slight decreasing in the pH in the channel stream and summit areas. There was an increment of Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}, which indicates that one of the immediate wildfire effect was to liberate the mineral elements that become more abundant and they stimulate the plant-growing. The CIC diminished on the summit but it increased lightly in the backslope and the channel, which it is attributable to the impact of the OM combustion that accelerated the mineralization process and it favored the transfer and deposit of clays and humic complexes in the backslope and channel. The phosphorus presented a slight decreasing regarding to the NBA soils, being located the biggest quantity of this nutriment in the backslope and channel portions. The channel and the backslope were the slope portions that presented bigger differences attributable to that the wildfire has a bigger intensity and duration, causing larger alterations in the physical and chemical soil properties, while in the summit area the differences were smaller, because they are considered more stable places.

Key words: Wildfire, soil, slope portions, physical and chemical soil-properties, El Pelado, Central Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los incendios constituyen uno de los agentes perturbadores más importantes y activos en los ecosistemas forestales que afectan a los bosques en el mundo, esto tiene mayor magnitud en los países en vías de desarrollo como México, donde este fenómeno ocupa el tercer lugar como causal de los procesos de deforestación (Andrev *et al.*, 2001; Trápaga, 2002).

Los efectos de los incendios sobre los ecosistemas forestales son diversos, y su importancia crece conforme hay mayor frecuencia de los episodios incendiarios en una misma zona (CSCA, 2007). Se tienen datos de que el volcán Ajusco, que se encuentra dentro del Distrito Federal, ha estado sujeto a incendios frecuentes, lo que ha favorecido la presencia de especies vegetales alóctonas, ya que durante varios años en un área no quemada se observaron doce especies de herbáceas, arbustivas y arbóreas, en tanto que en áreas quemadas se registraron 21 especies un año después del fuego (Rodríguez y Fulé, 1996).

Sin embargo, Fassbender y Bornemisza (1994) mencionan que los incendios pueden influir sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, siendo la intensidad y la duración del incendio la que puede afectar principalmente el nivel más superficial del suelo. Por lo que se considera que las temperaturas superiores a 60° C se vuelven críticas, pues producen la desnaturalización de proteínas y si están entre 80 y 100° C se acelera la oxidación de la materia orgánica. Por su parte, DeBano (1991) especifica que entre 200 y 300° C, el fósforo y el nitrógeno son volatilizados y a temperaturas mayores a 300° C se desprenden nutrimentos vitales del suelo, y en el caso extremo, al sobrepasar los 800° C, se elimina la vegetación.

No obstante, Jalaluddin (1969) sugiere que la incorporación de la ceniza al suelo aumenta su pH, mientras que Viro (1974) señala que en un incendio forestal se registra un aumento del 300% en calcio y 200% en magnesio. Aguirre y Rey (1980) indican que el fuego quema la cobertura vegetal y el lecho orgánico del suelo es destruido; mientras que García y Maass (1998) sugieren que el relieve influye en el contenido de la materia orgánica y de nutrimentos, modificando las características microclimáticas, el contenido de humedad y el movimiento del agua dentro y fuera del suelo.

En los espacios rurales del Distrito Federal, la causa de los incendios forestales es la quema de pastizales para obtener renuevos como forraje para el ganado, incrementar la superficie agrícola y acelerar el cambio de uso de suelo, debido al crecimiento de las áreas urbanizadas (Paré, 1999).

La CORENADER (2002) señala que, en su mayoría, los incendios son provocados por acciones humanas y se presentan con mayor incidencia durante el mes de abril, sobre todo por las mañanas cuando la humedad relativa de los materiales combustibles es de 32% y decrece a 18% cerca del mediodía. También se debe considerar que en la Cuenca de México, los vientos en el día son ascendentes y en la noche descendentes, lo cual marca diferencias durante un incendio forestal, ya que la abrupta

topografía provoca vientos turbulentos que intensifican el fuego, facilitan su propagación y hacen más agresivo un incendio (Rodríguez, 1996).

Por tanto, los incendios presentan un impacto ecológico muy importante en los ecosistemas, y el relieve provoca diferentes niveles de susceptibilidad por el comportamiento dinámico de las áreas quemadas, ya que por lo general, en los suelos de la superficie cumbral existe poca velocidad de flujo y un transporte reducido de material, mientras que en los dorsos de las laderas se presenta una menor estabilidad, debido a que los suelos están expuestos a los procesos erosivos, de igual forma los cauces son formas muy activas dentro del ciclo de denudación y de acumulación (Galicia *et al.,* 1995). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto en las propiedades físicas y químicas de los suelos en un área afectada por un incendio forestal, considerando tres posiciones en el relieve de una microcuenca hidrográfica, en el volcán El Pelado, Distrito Federal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

La microcuenca hidrográfica en estudio se localiza en las coordenadas geográficas latitud norte 19°09' y longitud oeste 99°12', correspondiente al área que cubren los flujos lávicos en la ladera norte del volcán El Pelado, el cual forma parte de la Sierra Chichinautzin.

El Pelado es un cono de escoria monogenético, y se encuentra en la delegación Tlalpan del Distrito Federal (Figura 1), tiene una altitud de 3 620 msnm y se estima que se originó durante el Cuaternario (Demant, 1978). Su clima es templado subhúmedo, con lluvias de verano, con un intervalo de temperatura media anual entre 5 y 12° C. En la cartografía existente de suelos (CETENAL, 1979), se reporta la presencia de suelos poco profundos como los litosoles y suelos desarrollados a partir de los depósitos de materiales piroclásticos, como los andosoles mólicos, que cubren los flujos lávicos

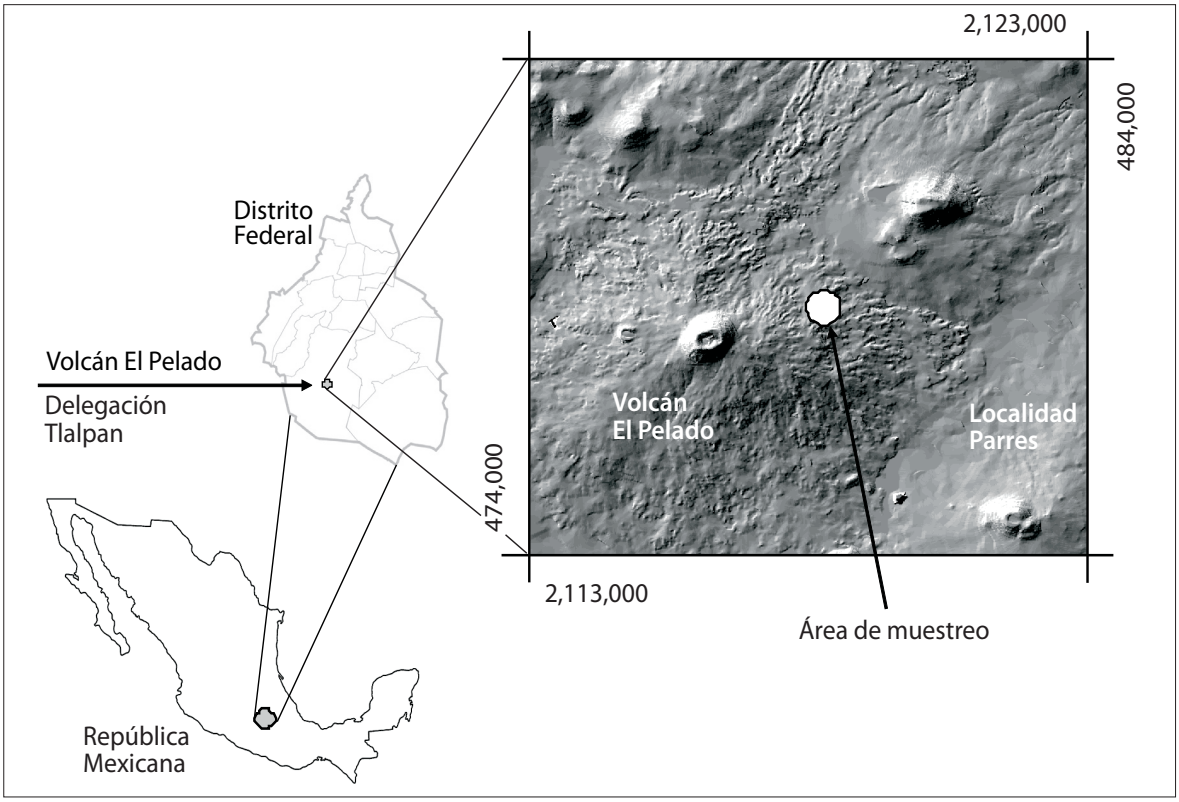

Figura 1. Localización del área en estudio en el volcán El Pelado, Centro de México.

de andesitas, basaltos y dacitas (Siebe *et al.,* 2004). El volcán se encuentra cubierto por un bosque de *Pinus* spp., con pastizal subalpino conformado por *Muhlenbergia macroura* (HBK)*, y Stipa ichu* (Ruiz & Pav) Kunth., como vegetación dominante (INEGI, 1983).

Muestreo de suelos

Se realizó un muestreo dirigido en suelos de áreas quemadas (SQ) y no quemadas (SNQ), en una microcuenca hidrográfica, considerando tres posiciones en el relieve: *a)* cauce, *b)* dorso de ladera y *c)* superficie cumbral de ladera (Figura 2). Las áreas mostraron características distintas ya que no abarcaban superficies homogéneas, debido a que los incendios se desplazan sobre las veredas o líneas corta fuego, y los vientos trasladan las llamas por las cañadas dejando marcadas las fronteras de dichos incendios forestales. Por tanto, los suelos de las áreas no quemadas fueron tomados a partir de un punto de referencia, bajo las mismas condiciones de relieve, por lo que las muestras de suelos no quemados tuvieron un transecto con seis sitios de muestreo, mientras que en los suelos quemados se establecieron tres transectos con 15 sitios de muestreo (Figura 2), es por ello que para las propiedades físicas y químicas del suelo, se calculó la media aritmética de los resultados individuales obtenidos, de cada posición en el relieve.

Para establecer la profundidad de toma de muestra de suelos, se utilizó el criterio representativo de su espesor superficial, ya que un incendio con 250° C de temperatura, afecta principalmente los primeros centímetros de profundidad, por estar expuestos a la superficie de calentamiento (DeBano, 1991; Rodríguez, 1996). Para ello se consideró lo propuesto por Marafa y Chau (1999), quienes mencionan que durante un incendio forestal, las propiedades químicas se modifican en los primeros 10 cm superficiales del suelo. Particularmente en el

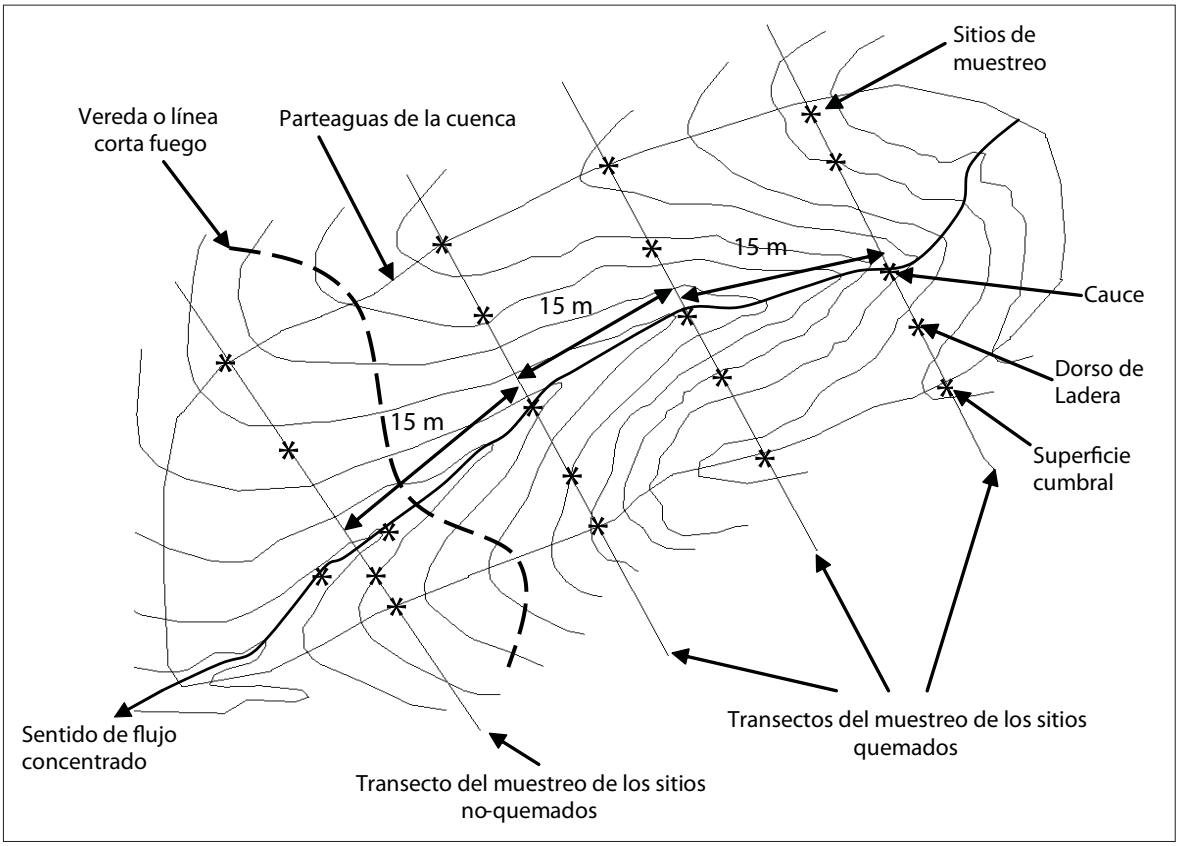

Figura 2. Transectos y sitios de muestreo de suelos dentro de la microcuenca hidrográfica.

área en estudio y para homogeneizar la profundidad en los sitios quemados y no quemados se consideró, a partir de la superficie, hasta una profundidad de 3 cm.

Procesamiento de las muestras de suelo en laboratorio

Los análisis realizados a las muestras de suelos fueron para obtener: densidad real (Dr) y densidad aparente (Da), de acuerdo con USDA (2004); la estimación de la porosidad con base en Baver *et al.* (1980); la textura se determinó por el método propuesto en Rodríguez y Rodríguez (2002); la estabilidad de agregados por Kemper y Rosenau (1986); la reacción del suelo (pH) se determinó en H_2O, usando la relación 1:2.5 y empleando un potenciómetro Corning con electrodo de vidrio; la materia orgánica (MO) por el método de oxidación vía húmeda con $K_2Cr_2O_7$ en medio ácido de Walkley y Black (1947); la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por centrifugación y titulación con EDTA (USDA, 2004); fósforo disponible por Bray y Kurtz, (1945); el análisis cuantitativo de Ca^{2+} y Mg^2 intercambiables por Jackson (1982); mientras que el Na^+ y K^+ intercambiables se determinaron utilizando un fotómetro de flama Corning 400.

Análisis estadístico multivariado

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), para comparar la representatividad de las propiedades químicas y la profundidad del suelo a partir de la prueba F (Spiegel, 1991). También se efectuó un análisis de agrupamiento (*CLUSTER*) que se aplicó a los valores de los análisis físicos y químicos de acuerdo con sus tratamientos (quemado y no quemado), utilizando el método que congrega grupos por disimilitudes de manera jerárquica a través de la distancia euclidiana estándar (Johnson, 2000). El análisis *cluster* se aplicó con el fin de establecer si existe una ordenación tangible de grupos jerárquicos, a partir de los valores de las propiedades físicas y químicas de los suelos, en función de las tres posiciones en el relieve.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas de los suelos de áreas no quemadas

La densidad aparente en los suelos no quemados es menor de 1 Mg m^{-3} debido a la presencia de materiales orgánicos provenientes de la vegetación del lugar, compuesta principalmente por acículas de *Pinus* spp., y pastos amacollados como *Muhlenbergia macroura* (HBK)*, y Stipa ichu* (Ruiz & Pav) Kunth., así como a la presencia de materiales piroclásticos de características ándicas que cubren los flujos lávicos de andesitas, que son comunes en el área en estudio (Rodríguez y López, 2006).

El transporte de materiales orgánicos y de fragmentos de rocas y cenizas, provocados por el agua y los procesos gravitacionales, ha favorecido que en el dorso de ladera y el cauce, de la microcuenca hidrográfica, se incrementen gradualmente la densidad real y la porosidad del suelo (Tabla 1).

La superficie cumbral presentó un elevado contenido de humedad, en parte debido a que los suelos derivados de cenizas volcánicas son ricos en materia orgánica y alófano, lo que favorece la porosidad creada por su estructura (Shoji *et al.,* 1993), es por ello que pueden retener un gran porcentaje de humedad, la cual disminuye ligeramente en el dorso de ladera, donde se presentan, con mayor intensidad, los procesos erosivos y de lixiviación, incrementándose nuevamente en las áreas de acumulación, como sucede en el cauce de la microcuenca**.**

La estructura de estos suelos se caracteriza por ser poliédrica subangular moderadamente desarrollada, la cual es frecuente en suelos Andosoles del área en estudio (Rodríguez y López, 2006). En relación con las partículas del suelo, las arcillas son más abundantes en la superficie cumbral y en el cauce, que en el dorso de la ladera, por ser este último más susceptible al transporte de materiales por la lluvia, viento y gravedad (Tabla 1).

Propiedades físicas de los suelos de áreas quemadas

La densidad aparente aumentó en la superficie cumbral y en el cauce (Tabla 1), como producto de la combustión ejercida sobre la materia orgáni-

Tabla 1. Propiedades físicas de los suelos

Sitios	Profundidad	Densidad		Porosidad	Humedad	Partículas del suelo			Textura
		aparente	real			arenas	limos	arcillas	
	- cm -	- - - Mg m^{-3} - - -		- - - - - - - - - - - - - - - - - % - - - - - - - - - - - - - - -					
Suelos no quemados									
Superficie cumbral	0 - 3	0.6	1.2	47.89	84.31	51.23	38.36	10.41	Franca
Dorso de ladera	0 - 3	0.6	1.5	57.82	74.46	61.76	31.23	7.01	Franco-arenosa
Cauce	0 - 3	0.6	1.5	60.95	79.42	54.67	37.43	7.90	Franco-arenosa
Suelos quemados									
Superficie cumbral	0 - 3	0.7	1.3	45.31	66.18	55.00	37.99	7.01	Franco-arenosa
Dorso de ladera	0 - 3	0.6	1.3	51.87	72.74	53.16	36.48	10.36	Franco-arenosa
Cauce	0 - 3	0.7	1.0	33.66	76.29	51.74	40.38	7.88	Franca

ca, lo cual se considera puede afectar la estructura del suelo, debido a que los suelos que han estado sujetos al impacto del fuego son más susceptibles a la desagregación, reduciendo la macroporosidad y formando huecos que pueden ser rellenados por las partículas del suelo y cenizas, incrementando la densidad aparente (Mallik *et al.,* 1984).

Los datos sobre la densidad real indican una ligera disminución en el dorso de la ladera y el cauce, como consecuencia de los recubrimientos hidrófobos en los agregados del suelo, inducidos por la condensación de moléculas orgánicas volatilizadas durante la combustión de la vegetación (DeBano, 1981).

La humedad del suelo disminuyó debido a la deshidratación provocada por la combustión de los materiales orgánicos, y la porosidad fue menor, ya que al destruirse la estructura del suelo se produce una desestabilización de los agregados y una disminución progresiva de los mismos.

Cabe mencionar que el efecto del fuego en los suelos depende de la temperatura que éste alcance en la superficie, a las dimensiones individuales de los combustibles, al contenido de humedad y a las condiciones del clima, antes y después del incendio (Ice *et al.,* 2004). A pesar de que el incendio fue de baja intensidad, la mayor temperatura se presentó en la superficie cumbral, manifestándose con un menor contenido de humedad y porosidad, afectando su capacidad de infiltración y retención del agua en los suelos.

Cantidad y estabilidad de los agregados en suelos de áreas no quemadas y quemadas

Los agregados de mayor tamaño en suelos no quemados se encuentran principalmente en el dorso de ladera, en donde predominan los macroagregados de 2 a 4.75 mm de diámetro, seguida del cauce; mientras que en los dorsos de ladera al existir un flujo mayor de arcillas, sesquióxidos y sustancias de origen orgánico, que actúan como aglutinantes, promueven la formación de agregados de mayor tamaño (Acevedo *et al.,* 2001).

Se ha considerado que el efecto del fuego disminuye la formación de macroagregados pero, como consecuencia de ello, se incrementa el número de microagregados al disgregarse aquéllos (Tabla 2), debido a que se produce una pérdida de materiales agregantes de origen orgánico, por la combustión (DeBano, 1991). Esto, sumado al transporte de

Tabla 2. Agregados en los suelos quemados y no quemados de la microcuenca

Sitios	Profundidad	Cantidad de agregados				
		Microagregados	Mesoagregados		Macroagregados	
		(0.25–0.50 mm)	(0.50-1.00 mm)	(1.00-2.0 mm)	(2.00 -4.75 mm)	(>4.75 mm)
	- cm -	----------% ----------				
Suelos no quemados						
Superficie cumbral	0 - 3	2.02	3.08	3.51	8.47	4.78
Dorso de ladera	0 - 3	3.75	6.20	5.81	11.76	6.64
Cauce	0 - 3	1.85	4.37	3.72	9.05	4.88
Suelos quemados						
Superficie cumbral	0 - 3	2.79	4.17	3.39	7.45	2.62
Dorso de ladera	0 - 3	4.02	5.35	4.24	8.24	2.62
Cauce	0 - 3	2.85	8.06	5.23	9.96	4.48

materiales, provoca que la mayor cantidad de agregados se encuentre en el cauce de la cuenca, donde predominan los mesoagregados (0.5 a 2.00 mm) que se forman por la microignifracción que quizás se vea enmascarada por una eventual y débil reestructuración (Úbeda, 2001), seguidos de los agregados de tamaño 0.25 a 0.50 mm.

Los incendios juegan un papel importante en la formación de suelos hidrófobos, puesto que las sustancias hidrofóbicas no humificables procedentes de la descomposición de la MO se volatizan y pueden difundirse hacia abajo, donde la temperatura es menor, condensándose sobre las partículas del suelo, propiciando una unión no estable, ya que no permite la entrada de agua (Giovannini *et al.,* 2001).

Así se tiene que la estabilidad de los agregados más pequeños depende en mayor medida de los componentes minerales del suelo (Boix *et al.,* 2001), debido a que son especialmente hidrofóbicos y pueden provocar una reducción de la infiltración durante un periodo posterior al incendio (Llovet, 2006), lo que puede producir una desestabilización de agregados y una disgregación progresiva, ya que la materia sólida puede ser eliminada del suelo por la acción erosiva del agua de lluvia o del viento.

Propiedades químicas de los suelos de áreas no quemadas

Los suelos son ligeramente ácidos (Vázquez, 1997), por los aportes provenientes de la descomposición de la materia orgánica, principalmente compuesta por acículas de *Pinus* spp., que son potencialmente acidificantes por la producción de ácidos orgánicos que influyen en la formación de complejos Al-humus en estos suelos (Shoji *et al*., 1993).

Los suelos de áreas no quemadas son muy ricos en MO, proveniente de la vegetación del lugar, la cual está compuesta por *Pinus* spp., y pastos amacollados como *Muhlenbergia macroura* (HBK), *y Stipa ichu* (Ruiz & Pav) Kunth.

Los suelos más ricos en MO se encuentran en el cauce, en comparación con el dorso de la ladera y la superficie cumbral, lo que concuerda con lo reportado por Raghubanshi (1992), quien menciona que el dorso de las laderas tienen menor cantidad de materia orgánica debido a que el material es

removido a mayor velocidad que en las partes altas, como la superficie cumbral.

La CIC, de acuerdo con Vázquez (1997), se considera alta, siendo mayor en la superficie cumbral, por ser un área geomorfológicamente más estable y con mayor contenido de arcillas que el dorso de la ladera, en donde disminuye gradualmente y donde se genera un mayor movimiento de partículas, de componentes orgánicos y minerales amorfos. Sin embargo, la CIC se incrementa nuevamente, por la acumulación de estos materiales en el cauce de la microcuenca hidrográfica (Tabla 3), de manera semejante a como lo encontraron Galicia *et al.* (1995).

Los valores de fósforo disponible se consideran bajos, debido a que estos suelos al presentar complejos de tipo alofánico, tienden a fijar este mineral (Shoji *et al.*, 1993). El complejo de cambio está dominado por el calcio y el magnesio (Tabla 3), elementos derivados de la alteración de los materiales piroclásticos del área en estudio, donde predominan minerales ferromagnesianos como olivinos y piroxenos, así como los feldespatos de tipo cálcico (Rodríguez y López, 2006).

Propiedades químicas de los suelos en áreas incendiadas

Debido a que los suelos de la microcuenca hidrográfica estuvieron sujetos a un incendio de baja intensidad, la combustión de la materia orgánica no fue completa (Afif y Oliveira, 2006), aunque presentaron un ligero incremento en su pH (Tabla 3), tal como lo reportan DeBano *et al.* (1998), Maycotte *et al.* (2002), Litton y Santelices (2003) y que de acuerdo con Giovannini (1994), se debe a la pérdida de grupos hidróxilo por parte de las arcillas y a la formación de óxidos.

La cantidad de carbono está directamente relacionada con la cantidad de materia orgánica del suelo. Sin embargo, se observó un ligero incremento en el contenido de carbono orgánico en el dorso de ladera y el cauce. Es conveniente mencionar que solo cuando la temperatura rebasa los 450° C la combustión de la materia orgánica es casi total (*Ibid.*).

Sin embargo, en el incendio en la microcuenca, al ser de baja intensidad, la combustión de la materia orgánica no fue completa, lo que se manifestó con un ligero incremento de ésta en los suelos del dorso de ladera y el cauce, lo que coincide con lo reportado por Sánchez *et al.* (1994), Úbeda (2001), Afif y Oliveira (2006). Lo cual puede atribuirse a que las concentraciones de amonio se incrementan después de un incendio, como resultado directo de la temperatura, de la proporción de materia orgánica que se quema y de la acumulación de ceniza en el suelo (DeBano *et al.,* 1998; Fisher y Binkley, 2000).

El carbono orgánico total se incrementó en el dorso de ladera y el cauce, como consecuencia de que en estas áreas el incendio fue menos intenso, mientras que hubo un decremento de carbono orgánico, en la superficie cumbral, donde el incendio alcanzó una mayor temperatura, lo cual coincide con lo reportado por Úbeda (2001).

La posible pérdida de carbono orgánico, que ocurriría como consecuencia de la quema de la materia orgánica, es compensada por los aportes del material quemado que se acumula sobre el suelo, dando un balance positivo en cationes después de la quema (Afif y Oliveira, 2006).

La CIC disminuyó en la superficie cumbral pero aumentó ligeramente en el dorso de ladera y el cauce, debido a que el impacto de la combustión aceleró el proceso de mineralización, aunado al transporte y acumulación de materiales de origen orgánico y de minerales del tamaño de arcillas en el dorso de ladera y el cauce de la cuenca hidrográfica.

Generalmente después de un incendio se registra un incrementó en nutrimentos asimilables como el calcio, magnesio y el fósforo (DeBano *et al.,* 1998; Ortega y Rodríguez, 2007). El Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+} intercambiables, se incrementaron, sin embargo, por las condiciones de relieve, disminuyeron gradualmente en el dorso de la ladera y la superficie cumbral, encontrándose en mayor cantidad en el cauce de la cuenca hidrográfica (Tabla 3).

Estos elementos no pueden ser volatilizados durante un incendio de baja intensidad y las sustancias contenidas en la materia orgánica se liberan formando óxidos o carbonatos con estos cationes, dependiendo del tipo de vegetación del lugar, situación que ya ha sido reportada en Maycotte *et*

al. (2002), Martínez *et al.* (2004), Afif y Oliveira (2006). En cuanto al Na^+, éste disminuyó ligeramente, debido a que se considera es el catión más soluble en los suelos (Plata y Guitian, 1966).

El fósforo asimilable es un elemento relativamente estable en los suelos, debido a su baja solubilidad (Fassbender y Bornemisza, 1994), aunque se observó un ligero incremento en el dorso de ladera y el cauce, imputable a que la temperatura que se presentó durante el incendio fue capaz de mineralizar el fósforo orgánico, más que la adición de fósforo por la combustión de la vegetación (Úbeda, 2001).

Sin embargo, Litton y Santelices (2003) consideran que la volatilización no es muy común, por lo que la vegetación al ser consumida por el fuego, reincorpora este elemento en las cenizas que quedan sobre el suelo.

La mayor acumulación de bases se encontró en el dorso de ladera y el cauce (Tabla 3), lo que coincide con lo reportado por Maycotte *et al.* (2002), quienes afirman que algunos nutrimentos tienden a incrementarse en los sitios de menor elevación como sucedió con el calcio, magnesio y potasio en la microcuenca en estudio.

De lo anterior se desprende, que los pastizales en el volcán El Pelado son utilizados como alimento para el ganado que pastorea en el área y que de acuerdo con Benítez (1987), aparentemente los campesinos dependen del fuego como agente de renovación de nutrientes al suelo, ya que después del incendio se produce la liberación de nutrimentos de los tejidos de las plantas y el reciclaje de otros, motivando la formación de renuevos, lo cual es forraje tierno para el ganado ovino.

Análisis multivariado de agrupamiento en suelos de áreas no quemadas

El análisis de agrupamiento dividió a las variables en tres grupos. El dendrograma muestra que el *Grupo 1* integra a la materia orgánica con el carbono orgánico (Figura 3), ya que estas variables mantienen una estrecha relación natural, debido a que la materia orgánica del suelo es el reservorio de nitrógeno, azufre y otros nutrimentos, e interactúa con la fracción mineral influyendo en la estructura

Tabla 3. Propiedades químicas de los suelos

Sitios	Profundidad	pH_{H_2O} (1:2.5)	MO	Corg	P	CIC	Iones intercambiables			
							Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
	- cm -		- - - % - - -		ppm	Cmol $(^+)$ Kg^{-1}	- - - - - - - meq/100g - - - - - -			
Suelos no quemados										
Superficie cumbral	0 - 3	6.5	18.44	10.70	10.30	35.97	36.9	25.3	2.0	1.2
Dorso de ladera	0 - 3	6.5	14.95	8.67	11.20	34.37	58.5	51.9	2.2	1.6
Cauce	0 - 3	6.7	21.86	12.68	11.30	24.65	32.9	51.2	2.8	2.0
Suelos quemados										
Superficie cumbral	0 - 3	6.6	15.76	9.14	10.10	25.73	60.4	48.6	1.3	2.6
Dorso de ladera	0 - 3	6.6	20.08	11.65	10.50	36.88	65.9	51.0	1.8	3.0
Cauce	0 - 3	6.8	26.64	15.45	11.40	26.97	84.6	62.6	2.7	4.0

MO = Materia orgánica, Corg = Carbono orgánico total, P = Fósforo disponible, CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico.

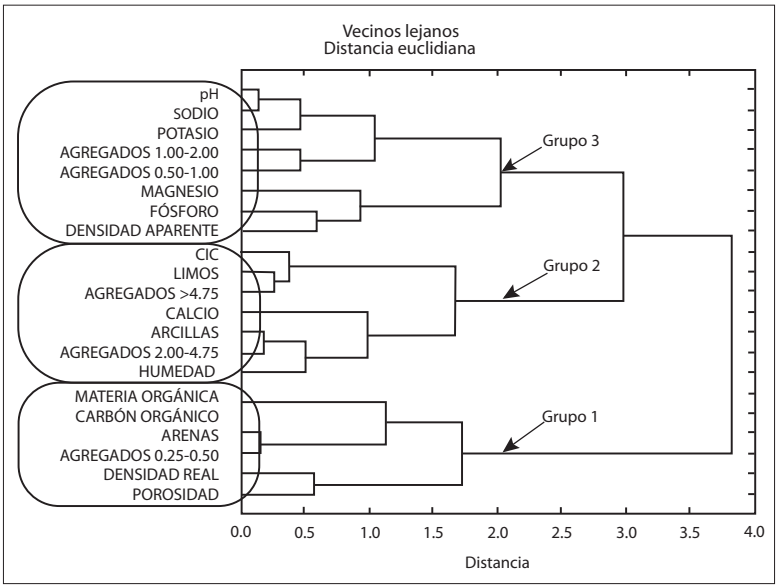

Figura 3. Dendrograma de agrupamiento para los suelos de áreas no quemadas.

y la porosidad del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1994; Broquen *et al.,* 2004).

Como un subgrupo, se presentan los agregados de 0.25 a 0.50 mm de diámetro y la porosidad, como un reflejo de que la materia orgánica es la variable de mayor importancia, ya que influye sobre los agregados, al unir las partículas del suelo favoreciendo la formación de la estructura y manteniendo un buen nivel de porosidad (Mahboubi *et al.*, 1993; Young, 1991).

El *Grupo 2* vincula la humedad del suelo con las arcillas y los agregados de 2 a 4.75 mm de diámetro. Esto manifiesta que el contenido de arcillas influye en la formación y estabilidad de los agregados del suelo (Acevedo *et al.,* 2001). Después se agrupan los limos con la CIC, Fassbender y Bornemisza (1994) explican que esta unión se efectúa con mayor proporción en suelos recientes en donde existe entre el 10 y 30% de la fracción de limo, como podría ser el caso del suelo del volcán El Pelado.

El *Grupo 3* agrupa al pH y al Na^+ con el K^+, en donde el Na^+ es considerado como un parcial sustituto del K^+, siendo dependientes del pH, ya que se considera que son suelos de carga variable (Navarro y Navarro, 2000). Los agregados con un tamaño de 1 a 2 mm y de 0.50 a 1 mm de diámetro, se agrupan por la similitud del porcentaje y por el diámetro de las partículas, ambos se consideraron para este estudio como mesoagregados.

Análisis multivariado de agrupamiento en suelos de áreas quemadas

Los resultados presentados en el dendrograma de la Figura 4, muestran tres grupos. El primero agrupa a la materia orgánica y al carbono orgánico, con los cationes intercambiables de Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+ y Na^+, debido a la combustión de la vegetación del lugar, que puede aportar estos nutrimentos mediante la ceniza que se incorpora al suelo (Young, 1991; Úbeda, 2001).

El *Grupo 2* agrupa a la densidad aparente y a los macroagregados, con los mesoagregados de 2 a 4.75 mm, y luego con los de 1 a 2 mm de diámetro. Esto es debido a que cuando el suelo se quema, los agregados más grandes al desagregarse, provocan un incremento en la cantidad de los meso y los microagregados, que se considera se forman debido a que las sustancias hidrofóbicas procedentes de la descomposición de la materia orgánica se volatizan y se desplazan hacia abajo donde la temperatura es menor, condensándose sobre las partículas del suelo, propiciando una unión no estable, ya que no permite la entrada de agua (Giovannini *et al.,* 1983).

El *Grupo 3* vincula al pH con las arcillas, la humedad y la CIC, donde la reacción del suelo influye de modo notable en la solubilidad de gran número de compuestos, y especialmente en los suelos de características ándicas, como son los estudiados aquí, en donde la CIC dependerá del pH y de la

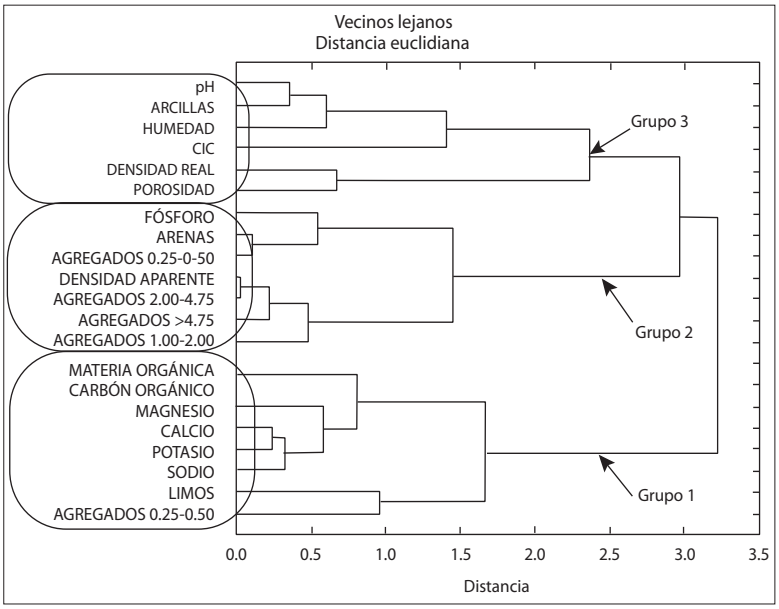

Figura 4. Dendrograma de agrupamiento para los suelos de áreas quemadas.

presencia de materiales amorfos como el alófano e imogolita (Broquen *et al.,* 2004).

CONCLUSIONES

Los suelos estuvieron sujetos a un incendio de baja intensidad, donde se considera que las temperaturas alcanzadas fueron no extremas y aunque la combustión de la MO no fue completa, hubo un incremento en el pH, en la materia orgánica y en los cationes intercambiables de Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}, especialmente en el dorso de la ladera y en el cauce, por lo que se concluye que uno de los efectos inmediatos del incendio fue la liberación de fito-nutrimentos.

El incremento en la materia orgánica del suelo se atribuye a que las concentraciones de amonio pueden incrementarse después de un incendio, como resultado directo de la temperatura, de la proporción de materia orgánica que se quema y de la acumulación de cenizas en el suelo.

En los suelos quemados, la CIC disminuyó en la superficie cumbral, pero aumentó en el dorso de ladera y en el cauce, atribuible al impacto de la combustión que aceleró el proceso de mineralización, así como al transporte y depositación de arcillas y complejos húmicos.

La mayor acumulación de bases se encontró en el dorso de la ladera y el cauce, por lo que se considera que el relieve influye sobre la lixiviación y la distribución de nutrimentos ya que éstos tienden a incrementarse en los sitios de menor elevación.

Los agregados se encuentran en mayor cantidad en el cauce, debido a una desestabilización de los macroagregados, predominando los micro y mesoagregados por la pérdida de materia orgánica del suelo, por combustión y el transporte de éstos por los procesos de flujo hídrico que se presentan en la microcuenca.

El análisis estadístico de agrupamiento de las variables analizadas permitió detectar algunas relaciones funcionales a partir de su dimensionalidad para la formación de grupos. Para los suelos de las áreas no quemadas esas relaciones están dadas, en un caso, por la presencia de MO y carbón orgánico con la de los microagregados y el contenido de arenas, en otro por la presencia de arcillas y limos con los macroagregados y finalmente por la presencia de mesoagregados con los iones intercambiables y el pH. Para los suelos de las áreas quemadas están dadas, en una primera instancia, por la presencia de los iones intercambiables y la MO, con el carbón orgánico. Después, por la densidad aparente y el contenido de arenas, con la presencia de los

agregados de diferentes tamaños, y finalmente por el contenido de las arcillas y el pH, con el de la humedad en el suelo.

El cauce y el dorso de ladera fueron las porciones del relieve que presentaron las mayores diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo, atribuibles a que el incendio tuvo mayor magnitud y duración en ellas, provocando mayores alteraciones en esas propiedades, mientras que en la superficie cumbral las diferencias fueron menores, debido a que son sitios más estables dentro de la funcionalidad de morfogénesis-pedogénesis.

Los campesinos dependen del fuego como un agente de renovación de nutrientes al suelo, motivando la formación de renuevos en los pastizales del volcán El Pelado, que son utilizados como alimento para el ganado ovino.

REFERENCIAS

Acevedo S., O. A., A. Velázquez R. y D. Flores R. (2001), "Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados en condiciones de invernadero", *TERRA* 19(4), pp. 363-373.

Afif, K. E. y J. A. Oliveira P. (2006), "Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo", *Invest. Agrar. Sist. Recur. For.,* 15(3), pp. 262-270.

Aguirre, B. C. y C. J. Rey (1980), "Escorrentía y pérdida de suelo en asociaciones vegetales sujetas a quemas controladas", *Revista Chapingo*, 23(24), pp. 18-24.

Andrev, V., A. C. Imeson and J. L. Rubio (2001), "Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest", *Catena*, 44, pp. 69-84.

Baver, L. D., W. H. Gardner y W. R. Gardner (1980), *Física de Suelos,* UTEHA, México.

Benítez-Badillo, G. (1987), "Efectos del fuego en la vegetación herbácea de un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl., de la Sierra del Ajusco", en Rapoport, H. E. e I. R. López-Moreno (eds.), *Aportes a la Ecología Urbana de la Ciudad de México,* Limusa, Instituto de Ecología y Museo de Historia de la Ciudad de México, México, pp. 111-152.

Boix-Fayos, C., A. Calvo-Cases, A. C. Imeson and M. D. Soriano-Soto (2001), "Influence of soil properties on the aggregation of some mediterranean soils and the use of agregate size and stability as land degradation indicators", *Catena*, 44, pp. 47-67.

Bray, R. H. and L. T. Kurtz (1945), "Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils", *Soil Sci.,* 59, pp. 39-45.

Broquen, P. F., Candan, J. C. Lobartini y J. L. Girardin (2004), "Relaciones entre el carbono orgánico y propiedades edáficas y del sitio en suelos derivados de cenizas volcánicas, sudoeste de Neuquén (Argentina)", *Ciencia del Suelo*, 22(2), pp. 73-82.

CETENAL (1979), *Carta Edafológica*, escala 1:50 000, clave E14A49, México.

CORENADER (2002), "Programa Integral de Prevención y Combate de Incendios Forestales del Distrito Federal (2001-2002), Reporte final julio 2002" *(Documento interno)*, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México, México.

CSCA (2007), "El suelo y los incendios forestales" [http: webpages.ull.es/users/jnotario/CSCA/ General/Soilfire.htm], (consultado 3 de marzo, 2007).

DeBano, L. F. (1981), "Water repellent soils: a state of the art.", USDA, For. Ser. Gen. Tech. Rep. Pac. Sothw. For. Range Exp. Sta. PSW46, Berkeley, CA.

DeBano, L. F. (1991), "The effect of fire on soil properties", *Proceedings management and productivity of western-Montane*. *Forest Soils*, pp. 151-155.

DeBano, L. F., D. G. Neardy and P. F. Ffolliott (1998), *Fire' s effects on ecosystems*, John Wiley & Sons, New York, USA.

Demant, A. (1978), "Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación", *Revista del Instituto de Geología*, 2(2), Instituto de Geología, UNAM. México, pp. 172-187.

Fassbender, H. W. y E. Bornemisza (1994), *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*, Ed. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica.

Fisher, F. R. and D. Binkley (2000), *Ecology and management of forest soils*, John Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 241-261.

Galicia, L., F. García y J. López-Blanco (1995), "Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana", *Investigaciones Geográficas, Boletín,* núm. esp. 3, Instituto de Geografía, UNAM, México pp. 53-76.

García, F. y J. M. Maass (1998), "Efecto de la transformación de la selva a pradera sobre la dinámica de los nutrientes en un ecosistema tropical estacional en México", *Bol. Soc. Bot. de México*, núm. 62, pp. 39-48.

Giovannini, G. (1994), "The effect of fire on soil quality", in Dala, M and J. L. Rubio (eds.), *Soil erosion as a consequence of forest fires*, Geoderma, ediciones Logroño, España, pp. 15-27.

Giovannini, G., R. Vallejo, S. Lucchesi, S. Bautista, S. Ciompi and J. Llovet (2001), "Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions", *Forest Ecology and Management*, no. 147, pp. 15-23.

Ice, G. G., D. G. Neary and P. W. Adams (2004), "Effects of wildfire on soils and watershed, *Processes*, 102(6), pp. 16-20.

INEGI (1983), *Carta de uso del suelo y vegetación*, escala 1:50 000, clave E14A49, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México.

Jackson, M. L. (1982), *Análisis Químico de Suelos*, 4ª. ed., Omega, Barcelona, España.

Jalaluddin, M. (1969), "Microorganic colonization of forest soil after burning", *Plant and Soil,* no. 30, pp. 150-152.

Johnson, D. E. (2000), *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*, Internacional Thomson Editores, México.

Kemper, W. D. and R. C. Rosenau (1986), "Aggregate stability and size distribution", in Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and minerological methods*, 2a. ed., American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 425-442.

Litton, C. M. and R. Santelices (2003), "Effect of wildfire on soil physical and chemical properties in a *Nothofagus glauca* forest, Chile", *Revista Chilena de Historia Natural*, núm. 76, pp. 529-542.

Llovet, L. J. (2006), "Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo", *Revista Ecosistemas* 2006/3, URL [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?ld=442£ld_Categoria=10£tipo=portada], (consultado 10 de enero 2007).

Mahboubi, A. A., R. Lal and N. R. Faussey (1993), "Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio", *Soil Sci. Soc. Ame. J.,* no. 57, pp. 506-512.

Mallik, A. V., C. H. Gimingham and A. A. Rahman (1984), "Ecological effects of heather burning. I. water infiltration, moisture retention and porosity of surface soil", *Journal of Ecology*, no. 72, pp. 767-776.

Marafa, L. M. and K. C. Chau (1999), "Effect of hill fire on upland soil in Hong Kong", *Forest Ecol. Manag.,* no. 120, pp. 97-104.

Martínez B., L. W., R. M. Ramos, M. I. Castillo, V. M. Bonilla y S. R. Sotolongo (2004), "Efectos de las quemas prescritas sobre las propiedades del suelo en bosques de *Pinus tropicalis* Morelet., en Cuba", *Revista Chapingo,* 1(1), pp. 31-35.

Maycotte, M. C., M. A. Velásquez, S. A. Trinidad, J. J. Vargas, S. M. A. Musálem y C. G. Vera (2002), "Radiación fotosintética activa y propiedades fisicoquímicas en suelos forestales con y sin incendio", *Madera y Bosques*, 8(2), pp. 39-55.

Navarro, B. S. y G. G. Navarro (2000), *Química Agrícola*, Ed. Mundi-Prensa, México.

Paré, O. L. (1999), "Causas estructurales de los incendios", en Santiago Fragoso, H., M. Servin Massieu, H. Rodarte, R. Garfias y F. Ayala (eds.), *Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas,* UNAM, SEMARNAP, IPN, México, pp. 19-30.

Ortega, B. V. y T. D. Rodríguez (2007), "Supervivencia y crecimiento iniciales y concentración de nutrimentos de *Pinus Hartwegii* plantado en localidades quemadas", *Revista Chapingo*, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 13(2), pp. 115-124.

Plata, A. G. y O. F. Guitian (1966), "Transformaciones experimentales en el suelo por la acción del fuego", *An. Edad. Agrob.*, XXV (1-2), pp. 57-68.

Raghubanshi, A. S. (1992), "Effect of topografy on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest", *Soil Biology and Biochemistry*, no. 24, pp. 1445-150.

Rodríguez, D. A. (1996), *Incendios Forestales,* Universidad Autónoma de Chapingo, Ed. Mundi Prensa, México.

Rodríguez, D. A. and P. Z. Fulé (1996), "Fire ecology of mexican pines and a fire management proposal", *Int. Jo. Wildland Fire*, 12(1), pp. 23-37.

Rodríguez-Gamiño, L. y J. López-Blanco (2006), "Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 60, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 46-61.

Rodríguez, F. H. y A. J. Rodríguez (2002), *Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación*, Trillas, México.

Sánchez, J. R., V. J. Mangas, C. Ortíz and J. Bellot (1994), "Forest fire effect on soil chemical propierties and runoff", in Dala, M and J. L. Rubio (eds.), *Soil erosion as a consequence of forest fires*, Geoderma, ediciones Logroño, España, pp. 53-65.

Shoji, S., M. Manzyo and R. Dahlgren (1993), "Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization", *Developments in Soil Science* 21, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Siebe, C., V. Rodríguez-Lara, P. Schaaf and M. Abrams (2004), "Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards", *Bulletin of Volcanology,* no. 66, pp. 203-225.

Spiegel, M. R. (1991), *Estadística,* McGraw Hill, México.

Trápaga, D. Y. (2002), "El bosque en llamas", en Lugo, J. y M. Inbar (comps.), *Desastres Naturales en América Latina,* Fondo de Cultura Económica, México, pp. 223-240.

Úbeda, X. (2001), "Influencia de la intensidad de quemado sobre algunas propiedades del suelo después de un incendio forestal", *Revista Edafología*, núm. 8, pp. 41-49.

USDA (2004), *Soil survey laboratory methods manual,* Burt, R. (ed.), *Soil Survey Investigations Report*, no. 42, version 4.0, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Services.

Vázquez-Alarcón, A. (1997), *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo,* 2da. ed., Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.

Viro, P. J. (1974), "Effects of forest fire on soil", in Kozlowski, T. T. and C. E. Ahlgren (eds.), *Fire and Ecosystems*, Academia Press, New York, pp. 7-45.

Walkley, A. and I. A. Black (1947), "An examination of the degthareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic acid titration method", *Soil Science,* no. 37, pp. 29-38.

Young, R. A. (1991), *Introducción a las Ciencias Forestales,* Limusa, México.