

MODIFICACIÓN DEL ESTADO NUTRICIONAL DE SUELOS DE LA SIERRA DE GUADARRAMA POR ACCIÓN DE UN HIPOTÉTICO INCENDIO FORESTAL *

MARTA FRAGA*, ANA MARÍA MORENO* Y JUANA GONZÁLEZ*

RESUMEN

Se ha estudiado el efecto de un hipotético incendio forestal mediante calentamiento a diferentes temperaturas de suelos con similares características, pero con horizontes orgánicos de distinto espesor. Tras el calentamiento se ha simulado un proceso erosivo, eliminando los restos vegetales quemados y las cenizas, de igual forma que ocurre tras un incendio forestal por acción del agua de escorrentía o del viento, y se han comparado estos resultados con los de suelos no erosionados.

Existen pérdidas progresivas de C orgánico y N total al aumentar la temperatura de calentamiento, siendo mayores en caso de erosión simulada; las pérdidas máximas se han registrado para los suelos con horizonte orgánico de mayor espesor, tanto con erosión como sin ésta. El P disponible aumenta con el calentamiento en caso de ausencia de erosión, pero si ocurre un proceso erosivo hay descenso en el contenido de P disponible. El pH se mantiene o disminuye con el tratamiento a 200°C sin observarse influencia significativa de la ausencia o presencia de erosión; el pH aumenta a mayor temperatura por la adición de bases con las cenizas, alcanzándose valores más elevados en ausencia de erosión. La conductividad eléctrica (CE) aumenta en todos los casos, observándose los mayores valores para los suelos con mayor espesor de horizonte orgánico y en ausencia de erosión. Con los datos obtenidos se han calculado los balances de C, N y P en g/m² de suelo, los cuales han resultado negativos para C y N en todos los casos, mientras que para el P es negativo con simulación de proceso erosivo y positivo en caso de ausencia del mismo.

Palabras clave: incendios forestales, nutrientes, suelo, simulación en laboratorio.

SUMMARY

Effects of an hypothetical forest fire have been studied through heating at different temperatures soils with similar characteristics but with different thicks of organic layers. After the heating, an erosive process has been simulated, removing altered vegetal remains and ashes from surface, just like it occurs after a forest fire by action of run-off water or wind; results obtained after this treatment have been compared with those obtained from soils without simulated erosion.

Progressive losses of organic C and total N exist when heating temperature rises, being these losses higher with simulated erosion; highest losses have been observed in soils with larger thickness of organic layer. Available P rises with heating in absence of erosion, but when an erosion process happens,

* Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid.

Recibido: 11/07/00.

Aceptado: 20/09/00.

there is a loss. pH stands or decreases slightly with 200°C, and no significative influence of presence or absence of erosion is observed; pH increases with higher temperature by addition of bases with the ashes, and higher values are reached in absence of erosion. EC increases in all cases, being the higher EC for soils with larger thickness of organic layer. With all these data, C, N and P balances (g/m^2) have been calculated; C and N balances are negative in all cases, while P balances are negative with erosion process and positive without erosion.

Keywords: forest fires, nutrients, soil, laboratory simulation.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades de los suelos sufren diversas modificaciones por acción de los incendios forestales, dependiendo de la frecuencia e intensidad de éstos. Las consecuencias directamente derivadas del fuego son la destrucción de la cubierta vegetal, la adición de cenizas de la vegetación quemada, lo que incorpora importantes cantidades de elementos al suelo, y el propio efecto de las altas temperaturas sobre las distintas propiedades edáficas, como destrucción y mineralización de la materia orgánica, modificación del pH, de la CE, de la CIC (GONZÁLEZ *et al.* 1992; ULERY *et al.* 1993 y del N (RAISON 1979) Con objeto de observar la influencia de la intensidad del incendio sobre las características del suelo, diversos autores han realizado calentamientos en condiciones experimentales de laboratorio (GIOVANNINI *et al.* 1997; IGLESIAS *et al.* 1998).

La erosión juega un papel importante en la evolución de los suelos impactados por el fuego (SOTO *et al.* 1997; DÍAZ-FERROS, 1996; KUTIEL e INBAR 1993), puesto que al destruirse la cubierta vegetal protectora se degrada la estructura y se alteran las propiedades físicas, haciéndose el suelo más susceptible a los procesos de erosión, conllevando a la pérdida de horizontes superficiales, e incluso a la pérdida total de suelo. Los materiales arrastrados pueden depositarse en zonas lacustres, causando la eutrofización de las aguas por el aporte de P y N, elementos que contribuyen también a la contaminación ambiental. (SMITH 1970).

Para este estudio se han escogido suelos que reflejan distintas posiciones fisiográficas y altitudinales de la zona, por lo que varía la cantidad de combustible natural en cada uno de ellos. Se han

sometido a temperaturas de calentamiento de 200°, 350° y 500 °C, que representan diferentes intensidades de un incendio (NISHITA y HAUG 1972) Las modificaciones observadas en los parámetros edáficos por este tratamiento se han comparado con las obtenidas simulando, después de calentar, un proceso erosivo con el que se perdería el horizonte superficial de los suelos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de los suelos

Se han estudiado suelos de la vertiente sur de la Sierra de Guadarrama situados en pendiente pronunciada (35%) a una altitud de 1500 m. Los suelos son Cambisoles húmicos (FAO 1989), desarrollados sobre material granítico y bajo vegetación de *Pinus sylvestris* var. *iberica* de la asociación *Pteridio aquilini-Pinetum ibericae* (RIVAS-MARTÍNEZ *et al.* 1999). El clima es Mediterráneo húmedo, con temperatura media anual de 6,4 °C y alta pluviosidad (1.409 mm anuales).

Modelo experimental

Se han muestreado los dos primeros horizontes de cada perfil (horizonte O orgánico y horizonte A_h organomineral) por ser éstos los más afectados por un incendio.

El horizonte orgánico está constituido por restos vegetales sin transformar o parcialmente descompuestos (acículas de pino, fundamentalmente, y restos de herbáceas). Este horizonte presenta espesores diferentes para cada suelo debido a la topografía de la zona, hecho que se ha tenido en cuenta al modelizar el experimento.

Se han sometido las muestras de horizontes orgánicos a calentamiento de 200°, 350° y 500 °C durante una hora en mufla, llevándose a cabo las determinaciones de C, N, P y pH.

Con el fin de conocer las repercusiones y prever los riesgos ante un hipotético incendio forestal en la zona, se ha llevado a cabo, por duplicado, el siguiente experimento: a 50 g de muestra de horizonte subsuperficial (A_h), contenido en cápsula de porcelana de fondo plano, se le añade en superficie la cantidad proporcional de horizonte orgánico que corresponde a cada suelo muestreado y se calienta durante una hora en mufla a 200° y 350 °C.

Se han establecido dos modelos experimentales (*I* y *II*): en el modelo *I* se simula un proceso erosivo al retirar los restos vegetales alterados por el calor y las cenizas, realizando las determinaciones analíticas en el horizonte subsuperficial. En el modelo *II* se ha supuesto ausencia de erosión, por lo que se homogeneiza todo el contenido de la cápsula y se analiza el conjunto. Se han determinado C orgánico (WALKLEY-BLACK 1974), N total (método Kjeldahl) y P disponible (OLSEN 1954), pH (1:5) y CE (1:10).

Las acículas de pino también se han sometido a 200°, 350° y 500 °C para saber en qué medida influye la vegetación en las modificaciones ocurridas en el suelo. De las muestras, naturales y calentadas, se ha obtenido un extracto acuoso (1:5), y en éste se han determinado pH, CE y cationes.

CARACTERÍSTICAS ANALÍTICAS DE LOS SUELOS DE LA ZONA

El suelo representativo de la zona de estudio tiene la siguiente secuencia de horizontes: O, A_h , B_w , C. El horizonte O tiene alto contenido en

materia orgánica, elevada relación C/N y pH ácido. La materia orgánica va descendiendo al profundizar, al igual que la relación C/N, y el pH va aumentando, por reducirse la influencia de la vegetación (tabla 1). El humus es tipo moder.

Efectos del calentamiento sobre horizontes orgánicos

Se han estudiado las modificaciones que sufren los horizontes orgánicos de los suelos de la zona al estar sometidos a temperaturas de 200°, 350° y 500 °C (figura 1). Existen pérdidas de peso crecientes al aumentar la temperatura, las cuales se pueden atribuir a la pérdida de humedad y a la volatilización de la materia orgánica.

El contenido en C orgánico va descendiendo gradualmente con el calentamiento; aparece igualmente una pérdida progresiva de N al aumentar la temperatura. Se observa un descenso en la relación C/N a medida que aumenta la temperatura de calentamiento, lo que equivaldría a un aumento en el grado de humificación (ALMENDROS 1990). Aumenta la cantidad de P extraíble debido a la mineralización del P orgánico (HARRISON 1982); este incremento es progresivo en todas las muestras hasta 350°, pero no a 500 °C.

Los horizontes orgánicos presentan pH ácido, como corresponde a la naturaleza de la vegetación. Este valor tiende a mantenerse a 200 °C, lo cual se puede atribuir a la liberación de grupos ácidos procedentes de la materia orgánica que a esta temperatura no se ha destruido. A mayores temperaturas aparecen importantes subidas del pH, hasta alcanzar valores muy básicos debido al aporte de bases de la materia vegetal incinerada.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS ANALÍTICAS DEL SUELO REPRESENTATIVO.
[ANALYTIC CHARACTERISTICS OF THE REPRESENTATIVE SOIL]

Horizonte	C (%)	N (%)	C/N	M.O. (%)	pH (H ₂ O)	Textura
O	23,9	1,2	19,9	41,1	5,77	
A_h	4,9	0,39	12,6	8,5	5,85	Franco arenosa
B_w	1,1	0,28	3,9	1,9	6,12	Franco arenosa
C	0,3	0,26	1,1	0,5	5,85	Arenosa

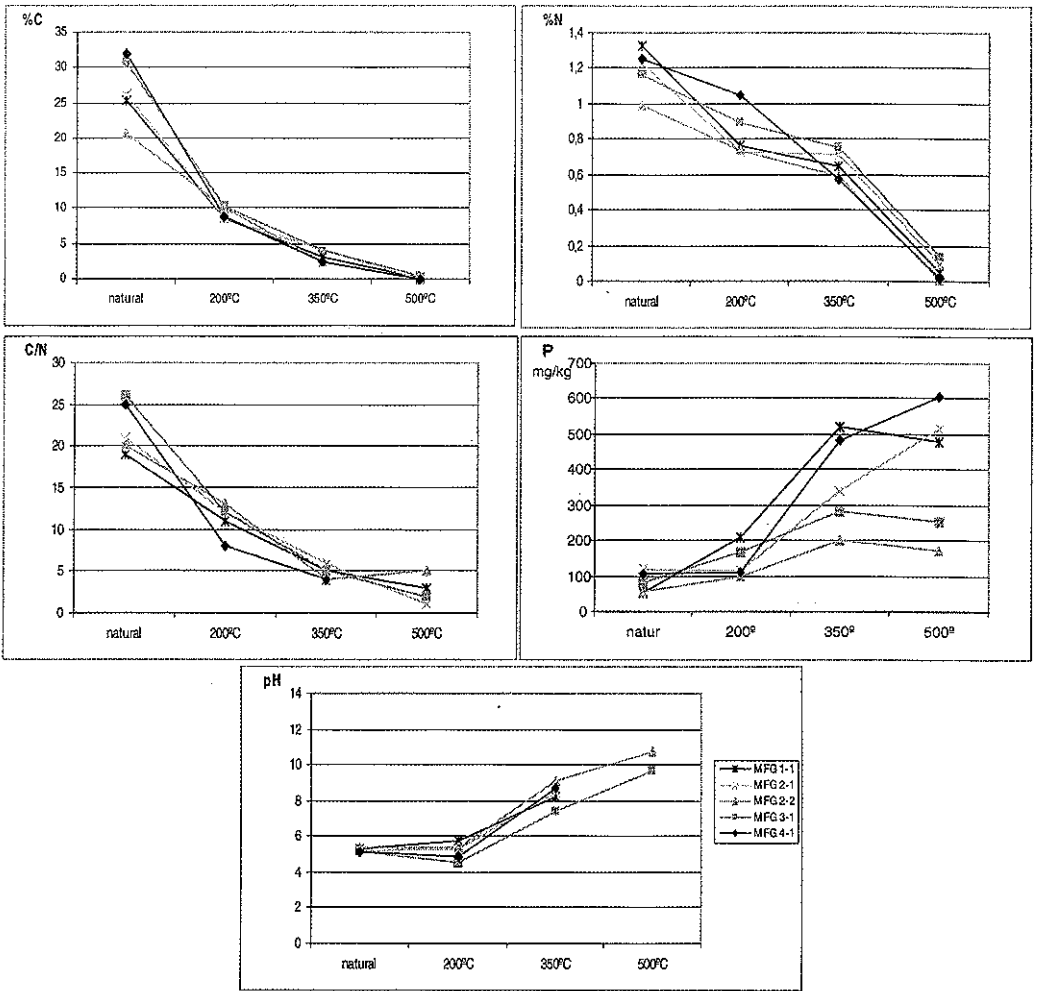


Fig. 1. Efectos del calentamiento en horizontes orgánicos: %C, %N, relación C/N, P disponible (mg kg⁻¹), pH. [Effects of heating in organic horizons: %C, %N, C/N ratio, available P (mg kg⁻¹), pH.]

Efectos del calentamiento sobre suelos con horizontes orgánicos de poco espesor (figura 2)

En estos suelos la relación entre horizonte O y horizonte A_h es de 1:12,5 en peso.

Se ha observado que al aumentar la temperatura de calentamiento disminuyen progresivamente los contenidos en C y N. Cuando existe eliminación del horizonte superficial por ero-

sión, a la pérdida de estos elementos por calentamiento del horizonte subsuperficial, hay que añadir la pérdida de C y N del horizonte erosionado.

Con el calentamiento existe aumento de P disponible respecto al contenido inicial, para los experimentos I (proceso erosivo) y II (sin erosión), y con ambas temperaturas de calentamiento. Cuando existe erosión, junto con el aumento en P del horizonte A_h por calentamiento, habría que

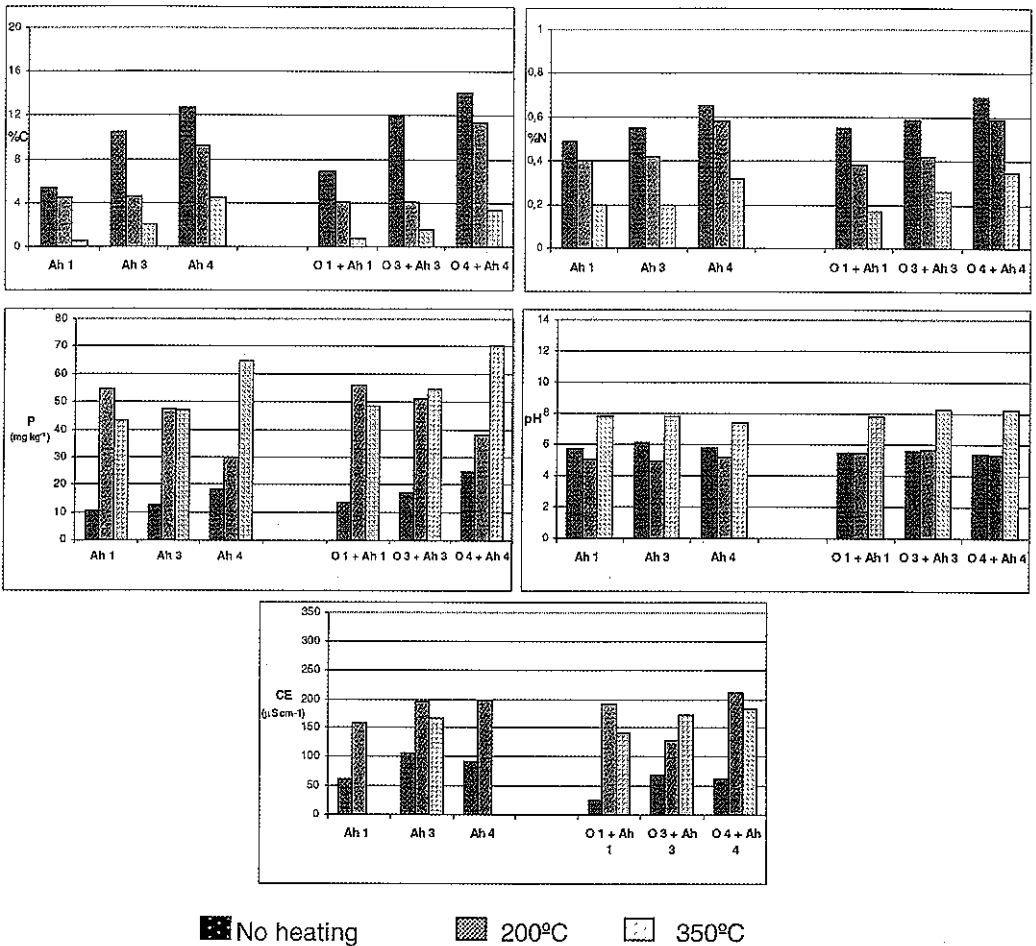


Fig. 2. Efectos del calentamiento en horizontes A_h (modelo I) y en O + A_h (modelo II) de suelos con horizonte orgánico de poco espesor: %C, %N, P disponible (mg kg^{-1}), pH, y CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$). [Effects of heating in Ah horizons (pattern I) and in O + A_h (pattern II) from soils with thin organic horizon: %C, %N, available P (mg kg^{-1}), pH, and EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$).]

considerar la pérdida de este elemento contenido en el horizonte superficial desaparecido.

Los valores de pH disminuyen o se mantienen a 200°C respecto a muestras naturales, se considere o no la existencia de erosión. El pH incrementa al aumentar la temperatura por el aporte de bases con las cenizas, alcanzando valores más elevados cuando no existe proceso erosivo.

En el modelo II (conjunto horizontes O + A_h) la CE incrementa con el calentamiento a 200 °C en

todos los casos, pero al aumentar la temperatura no aparece un incremento progresivo, debido al aporte de elementos en formas menos solubles.

Efectos del calentamiento sobre suelos con horizontes orgánicos de espesor medio (figura 3)

En estos suelos la relación entre horizonte O y horizonte A_h es de 1:6,8 en peso.

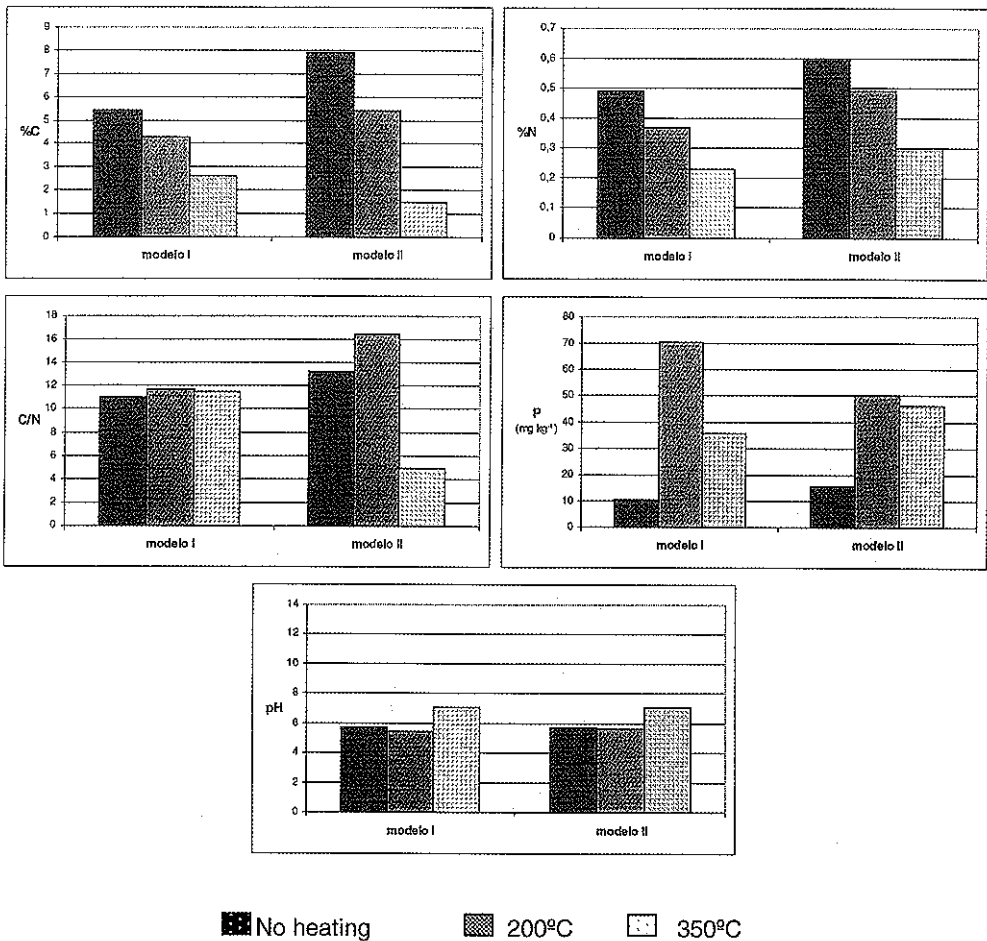


Fig. 3. Efectos del calentamiento en horizontes Ah (modelo I) y en O + Ah (modelo II) de suelos con horizonte orgánico de espesor medio: %C, %N, P disponible (mg kg⁻¹) y pH. [Effects of heating in A_h horizons (pattern I) and in O + A_h (pattern II) from soils with medium organic horizon: %C, %N, available P (mg kg⁻¹) and pH.]

Para el modelo I, con erosión simulada, los contenidos en C orgánico y N total van descendiendo paralelamente por calentamiento respecto a muestras naturales, por lo que la relación C/N apenas se ve modificada en las muestras calentadas. Cuando existe erosión, a las pérdidas por calentamiento de estos elementos en el horizonte Ah, hay que añadir las pérdidas de C y N por la eliminación del horizonte superficial. El P disponible aumenta con el calentamiento, tanto en el modelo I como en el II.

El pH desciende con el calentamiento a 200°C en caso de erosión simulada, y apenas se ve modificado a esta temperatura en el modelo II. Tras el calentamiento a 350 °C el pH aumenta en ambos modelos, pasando de 5,7 a 7,0.

La CE presentó fuertes incrementos en ambos modelos con el calentamiento, alcanzándose los mayores valores a 200°.

Efectos del calentamiento sobre suelos con horizontes orgánicos de gran espesor (figura 4)

En estos suelos la relación entre horizonte O y horizonte A_n es de 1:2,7 en peso.

Los contenidos en C y N disminuyen con el calentamiento en los dos modelos. A 350 °C se hace más patente la influencia del horizonte O, disminuyendo mucho el contenido en C en suelos sin erosión.

Las proporciones de P disponible siempre aumentan por calentamiento respecto a las muestras naturales. A 350 °C el aumento no siempre es progresivo, manteniéndose contenidos más elevados en suelos sin erosión que cuando existe este proceso, ya que la forma extraíble de P procede de la transformación del P orgánico.

Los valores de pH en ambos modelos tienden a mantenerse o disminuir al calentar a 200 °C. A 350 °C se presenta un incremento del pH por el aporte de bases, que es más elevado en suelos sin

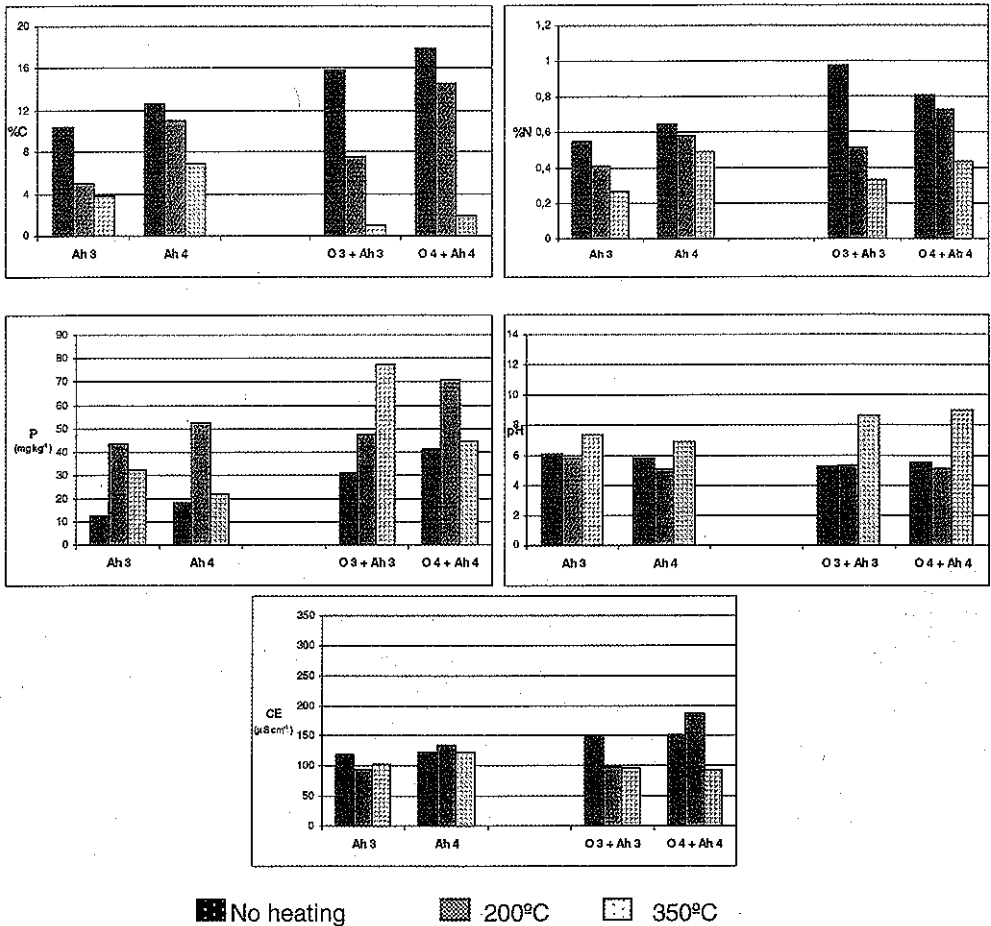


Fig. 4. Efectos del calentamiento en horizontes A_n (modelo I) y en O + A_n (modelo II) de suelos con horizonte orgánico de gran espesor: %C, %N, P disponible (mg kg⁻¹), pH y CE (µS cm⁻¹). [Effects of heating in A_n horizons (pattern I) and in O + A_n (pattern II) from soils with thick organic horizon: %C, %N, available P (mg kg⁻¹), pH and EC (µS cm⁻¹).]

erosión por influencia del horizonte orgánico, alcanzando valores superiores a 8.

La CE presenta un comportamiento irregular con el calentamiento a 200 °C. Los valores a 350 °C siempre son inferiores a los de las muestras naturales en los dos modelos, existiendo diferencias más acusadas para el modelo II por la influencia del horizonte orgánico.

Efectos del calentamiento sobre los restos vegetales

Tras el calentamiento a 200°, 350° y 500 °C durante una hora de las acículas de *P. sylvestris*, se han obtenido sus correspondientes extractos acuosos (1:5) en los que se han determinado pH, CE y cationes solubles (tabla 2).

El pH de estos extractos es ácido para las acículas sin calentar, aumenta bruscamente con el calentamiento a 200 °C, alcanzando un valor de 10,33 en las muestras calentadas a 500 °C. La CE, que ya es alta en las muestras al natural, aumenta a medida que lo hace la temperatura de calentamiento, siendo muy elevada a partir de 350 °C. Los cationes monovalentes (Na^+ y K^+) incrementan en muestras calentadas, mientras que los divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y Mn^{2+}) descienden con el calentamiento a 200 °C.

Balance de nutrientes en el suelo por acción de un hipotético incendio forestal

Con el fin de representar las pérdidas y ganancias de los distintos nutrientes del suelo por acción de las temperaturas alcanzadas durante un incendio y por una supuesta erosión post-incendio, se han

calculado los contenidos en C, N y P en g/m^2 de suelo natural y en las muestras calentadas de horizontes O y A_h en los suelos considerados. (figura 5). El balance de C orgánico y de N total resulta negativo para todos los casos a las temperaturas consideradas, mientras que existen ganancias de P en ausencia de erosión, y pérdidas cuando ésta aparece tras el incendio.

En los suelos cuyo horizonte orgánico es de menor espesor, las pérdidas de C oscilan entre 6200 y 9500 g/m^2 de suelo en caso de erosión post-incendio, y entre 1300 y 5000 g/m^2 en ausencia de ésta. De la misma forma, para el N la cantidad perdida está comprendida entre 280 y 370 g/m^2 , con erosión, y entre 47 y 180 g/m^2 , sin erosión. El balance de P resulta ser negativo en caso de erosión, perdiéndose entre 0,2 y 2,2 g/m^2 , mientras que en ausencia de proceso erosivo hay ganancias de P disponible comprendidas entre 0,6 y 3,2 g/m^2 de suelo.

En los suelos con horizonte orgánico de mediano espesor, las pérdidas de C con erosión oscilan entre 7900 y 8400 g/m^2 y son menores en ausencia de erosión, entre 1500 y 3800 g/m^2 . Para el N se pierden entre 366 y 400 g/m^2 con erosión, y sin ella las pérdidas se reducen al intervalo 66-222 g/m^2 . La cantidad de P disponible perdida tras el incendio y posterior erosión es de 2 g/m^2 , mientras que sin erosión existiría una ganancia de 2 g/m^2 de suelo.

Para aquellos suelos cuyos horizontes orgánicos son de mayor espesor, se perderían tras la erosión post-incendio entre 10100 y 11300 g de C por m^2 de suelo, mientras que en ausencia de erosión las pérdidas son menores, entre 1900 y 8900

TABLA 2
EFECTOS DEL CALENTAMIENTO EN LOS RESTOS VEGETALES: pH, CE (μScm^{-1}), Y CATIONES ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) EN EXTRACTO ACUOSO (1:5).
[EFFECTS OF HEATING ON VEGETAL REMAINS: pH, CE (μScm^{-1}), AND CATIONS ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) WATER-EXTRACT (1:5)]

	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Mn^{2+}
Natural	4,78	260	1,01	0,5	0,18	1,14	0,86
200 °C	7,14	306	0,54	0,14	0,48	1,77	0,49
350 °C	9,57	3950			0,71		
500 °C	10,33	4290			1,07		

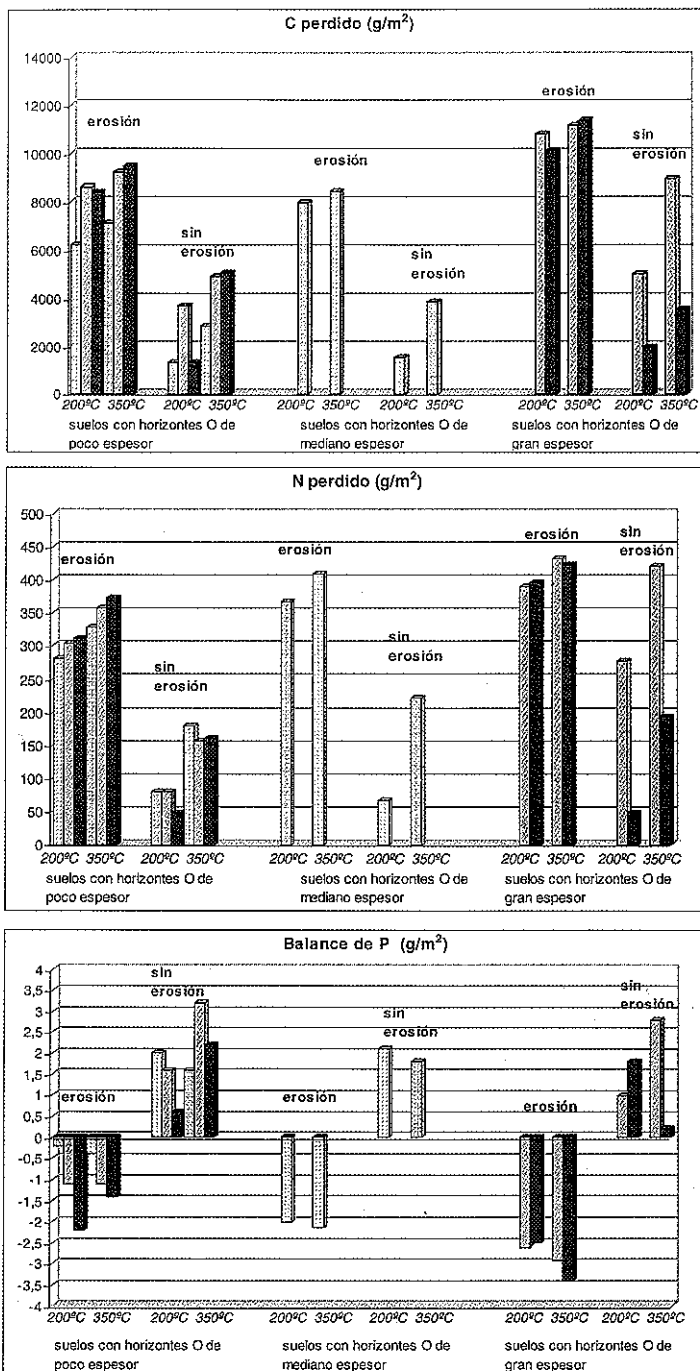


Fig. 5. Balance de nutrientes en suelos afectados por un hipotético incendio forestal: C, N y P disponible (g/m²). [Nutrients balance in soils affected by an hypothetical forest fire: C, N and available P (g/m²).]

g/m^2 . En el caso del N se perderían tras la erosión entre 390 y 432 g/m^2 , y en ausencia de la misma, la pérdida sería entre 48 y 420 g/m^2 . El P disponible se vería reducido entre 2,5 y 3,4 g/m^2 de suelo tras incendio y erosión, aumentando entre 1 y 2,8 g/m^2 si no aparece erosión post-incendio.

CONCLUSIONES

Las altas temperaturas alcanzadas en los primeros centímetros del suelo durante un incendio forestal afectan a diversas propiedades y al contenido en nutrientes de éste.

En los horizontes orgánicos superficiales hay descenso progresivo de C orgánico y N total al aumentar la temperatura de calentamiento. Incrementa el contenido de P disponible por mineralización del P orgánico, y aumenta la CE por incorporarse al suelo elementos solubles procedentes de las cenizas. El pH apenas se modifica con el calentamiento a 200 °C porque se contrarresta la adición de bases de la vegetación quemada con la liberación de grupos ácidos procedentes de la materia orgánica no destruida completamente a esta temperatura. A mayor temperatura el pH aumenta notablemente.

El pH de las acículas de pino sometidas a las mismas temperaturas, aumenta a medida que lo hace la temperatura, así como la CE, la cual alcanza valores muy elevados a 350 °C. La cantidad de Na^+ y K^+ es mayor en los extractos acuosos de las

muestras calentadas que en los de las muestras al natural, mientras que la cantidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Mn^{2+} se va reduciendo.

Atendiendo a los efectos producidos en el conjunto de los dos primeros horizontes de estos suelos, aparecen mayores pérdidas de C orgánico y N total al aumentar la temperatura de calentamiento, y éstas son más importantes en caso de que exista erosión post-incendio que elimine la capa superficial de restos vegetales alterados por el calor y de cenizas; las mayores pérdidas se han registrado para los suelos con horizonte orgánico de mayor espesor, tanto con erosión como sin ésta. El P disponible aumenta con el calentamiento en ausencia de erosión, pero si ocurre un proceso erosivo tras el calentamiento, hay descenso en el contenido de P disponible. El pH se mantiene o disminuye con el tratamiento a 200 °C, sin observarse influencia significativa con ausencia o presencia de erosión; a mayor temperatura el pH aumenta por la adición de bases con las cenizas, alcanzándose los valores más elevados en ausencia de erosión. La CE aumenta en todos los casos, observándose los mayores valores para los suelos con mayor espesor de horizonte orgánico y en ausencia de erosión.

Los balances de C, N, expresados como g/m^2 de suelo, han resultado negativos para C y N en todos los casos, mientras que para el P es negativo con simulación de proceso erosivo y positivo en caso de ausencia del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMENDROS, G., GONZÁLEZ-VILA, F.J., MARTÍN, F. 1990. Fire-induced modification of soil organic matter from an oak forest: an experimental approach to the effects of fire on humic substances. *Soil Science*, 149 (3): 158-167.
- DÍAZ-FIERRROS, F. 1996. Erosión y restauración de suelos afectados por incendios forestales. *Sociedad Española de Geomorfología*, 1996: 89-107.
- FAO-UNESCO 1989. Mapa mundial de suelos.
- GIOVANNINI, G. y LUCCHESI, S. 1997. Modifications induced in soil physicochemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science*, 162(7): 479-486.
- GONZÁLEZ, J., FERNÁNDEZ, M.C. y GIMENO, G.P. 1992. Efectos de los incendios forestales sobre el suelo. *Suelo y Planta*, 2(1): 72-79.

- HARRISON, A.F. 1982. Labile organic phosphorus mineralization in relationship to soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 14: 342-351.
- IGLESIAS, T., CALA, V., WALTER, I. y GONZÁLEZ, J. 1998. Efectos de la temperatura y vegetación en suelos calentados en condiciones controladas de laboratorio. *Ecología*, 12: 105-111.
- KUTIEL, P. e INBAR, M. 1993. Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena*, 20: 129-139.
- NISHITA, H. y HAUG, R.M. 1972. Some physical and chemical characteristics of heated soils. *Soil Science*, 113 (6): 422-431.
- OLSEN, C. y WATANABE (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture Circular 939. Washington D.C.
- RAISON, R.J. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review. *Plant and Soil*, 51: 73-108.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., CANTÓ, P., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F., MOLINA, J.A., PIZARRO, J.M. y SÁNCHEZ-MATA, D. 1999. Synopsis of the Sierra de Guadarrama Vegetation. IAVS Geobotanical Excursion.
- SMITH, D.W. 1970. Concentration of soil nutrients before and after fire. *Canadian Journal of Soil Science*, 50: 17-29.
- SOTO, B., BASANTA, R. y DÍAZ-FIERROS, F. 1997. Effects of burning on nutrient balance in an area of gorse (*Ulex europaeus* L.) scrub. *The Science of the Total Environment*, 204: 271-281.
- ULERY A.L., GRAHAM, R.C. y ARMHEIN, C. 1993. Wood-ash composition and soil pH following an intense burning. *Soil Science*, 156(5): 358-364.
- WALKLEY, A. y BLACK, I.A. 1974. A critical examination of rapid method for determining organic carbon in soils. *Soil Science*, 63: 251-254.